



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehituse instituut

Mari-Ann Tammiste

**PUISTU KASVUKÄIGU MUDELID JA ÜLAKÕRGUSE
KASVU MODELLEERIMINE EESTI METSA KASVUKÄIGU
PÜSIPROOVITÜKKIDE VÕRGUSTIKU ANDMETEL**
STAND GROWTH AND YIELD MODELS AND TOP HEIGHT GROWTH
MODELLING ON ESTONIAN NETWORK OF FOREST RESEARCH
PLOTS DATA

Bakalaureusetöö

Metsanduse õppekava

Juhendaja(d): professor Andres Kiviste, *PhD*
peaspetsialist Allar Padari, *MSc*
kaasprofessor Diana Laarmann, *PhD*

Tartu 2021

| | | | |
|---|---|-------------------------------|------------|
| Eesti Maaülikool | | Bakalaureusetöö lühikokkuvõte | |
| Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | | |
| Autor: Mari-Ann Tammiste | | Õppekava: Metsandus | |
| Pealkiri: Puistu kasvukäigu mudelid ja ülakõrguse kasvu modelleerimine Eesti metsa kasvukäigu püsiproovitükkide võrgustiku andmetel | | | |
| Lehekülgi: | Jooniseid: 15 | Tabeleid: 12 | Lisasid: 4 |
| Osakond: | Metsakorralduse ja metsatööstuse õppetool | | |
| Uurimisvaldkond: | Bio- ja keskkonnateadused, metsandusteadus (puistu ehituse kasvukäigu modelleerimine) | | |
| CERC S-i kood: | B430 | | |
| Juhendaja(d): | Andres Kiviste, <i>PhD</i> ; Allar Padari, <i>MSc</i> ; Diana Laarmann, <i>PhD</i> | | |
| Kaitsmiskoht ja aasta: | Tartu, 2021 | | |
| <p>Metsamajanduse kavandamisel on olulised pikaajalised ja täpsed kasvukäigu prognoosid, mida tehakse erinevate kasvukäigu mudelite abil. Käesoleva uurimuse üheks eesmärgiks oli anda ülevaade erinevatest puistu kasvukäigu mudelistest. Teiseks bakalaureusetöö eesmärgiks oli välja töötada ülakõrguse kasvukäigu (boniteerimise) modelleerimise meetodika ja esmane mudel, mis võimalikult hästi kirjeldaks Eesti metsa kasvukäigu püsiproovitükkide (KKPRT) vanus-ülakõrgus mõõtmiste andmeid. Analüüs põhineb 903 proovitüki esimese ja viimase vaatluse andmete mõõtmispaaril. Töö tulemusena selgus, et ülakõrguse kasvukäigu mudeli sobivus puistu boniteerimiseks sõltub baasfunktsioonist ja modelleerimise meetodist. Lõputöö tulemusel loodi kahel erineval baasfunktsioonil (Korf ja Hossfeld IV) põhinevad erinevatel meetoditel konstrueeritud ülakõrguse mudelid, millest KKPRT andmeil osutus parimaks Hossfeldi IV funktsioonil loodud algebraline diferentsmudel. Töö tulemusel loodi KKPRT võrgustiku proovitükkide takseertunnuste andmestik, mis on tehtud eeltöoks lähitulevikus puistu diameetri, rinnaspindala, tiheduse ja tagavara juurdekasvu modelleerimiseks.</p> | | | |
| Märksõnad: ülakõrgus, kasvukäigu mudel, modelleerimine | | | |

| | | | |
|--|--|-------------------------------|---------------|
| Estonian University of Life Sciences | | Abstract of Bachelor's Thesis | |
| Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | | |
| Author: Mari-Ann Tammiste | | Speciality: Forestry | |
| Title: Stand growth and yield models and top height growth modelling on Estonian Network of Forest Research Plots data | | | |
| Pages: | Figures: 15 | Tables: 12 | Appendixes: 4 |
| Department: | Forest Management Planning and Wood Processing Technologies | | |
| Field of research: | Biosciences and Environment, forest | | |
| (CERC S) code: | B430 | | |
| Supervisors: | Andres Kiviste, <i>PhD</i> ; Allar Padari, <i>MSc</i> ; Diana Laarmann, <i>PhD</i> | | |
| Place and date: | Tartu, 2021 | | |
| <p>Long-term and accurate stand growth predictions made by using different stand growth models are important tools for forest management planning. One of the purposes of this research was to give an overview of different types of stand growth models. The second purpose of this bachelor’s thesis was to develop a top height growth (site productivity) modeling method and a primary model, which would best describe the age-top height data of the Estonian Network of Forest Research Plots (ENFRP). The study was based on pairs of data from the first and last measurement of 903 sample plots. As a result, it was found out that the suitability of top height model depends on the base functions and modeling methods used. Top height models were developed using two different base functions (Korf and Hossfeld IV) and three types of modeling methods, from which the Hossfeld IV model turned out to be the most suitable for the ENFRP dataset. As a side result, an inventory variables dataset of the ENFRP was developed for modeling the annual increment of stand diameter, basal area, density, and stock in the near future.</p> | | | |
| Keywords: top height, height growth, modeling | | | |

SISUKORD

| | |
|---|----|
| SISUKORD | 4 |
| TÄHISED JA LÜHENDID | 5 |
| SISSEJUHATUS | 7 |
| 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE KASVUMODELITEST | 8 |
| 1.1 Norra kuusikute tüvemahu juurdekasvu mudel | 8 |
| 1.2 Läti männikute tüvemahu juurdekasvu mudel..... | 9 |
| 1.3 Mehhiko männikute juurdekasvu mudel | 11 |
| 1.4 Hispaania kaasikute juurdekasvu mudel..... | 13 |
| 1.5 Eestis kehtiv ametlik puistu juurdekasvu mudel | 16 |
| 1.6 Statistilise metsainventeerimise (SMI) puistu juurdekasvu mudel..... | 17 |
| 2. MATERJAL JA METOODIKA..... | 19 |
| 2.1. Eesti metsa kasvukäigu püsiproovitükkide võrgustiku kirjeldus | 19 |
| 2.3. Proovitüki takseertunnuste arvutamine | 25 |
| 2.4. Puistu ülakõrguse kasvukäigu modelleerimine | 27 |
| 3. TULEMUSED JA ARUTELU | 33 |
| 3.1 I rinde keskmine kõrgus ja ülakõrgus proovitükkidel | 33 |
| 3.2 Puistu ülakõrguse ja vanuse mõõtmispaarid..... | 34 |
| 3.2.1 Puistu ülakõrguse kasvukäigu mudel Korfi funktsiooniga..... | 36 |
| 3.2.2 Elementide ülakõrguse ja vanuse seos Hossfeld IV funktsiooniga | 42 |
| 3.3 Ülakõrguse mudeli parendamise võimalusi..... | 47 |
| KOKKUVÕTE | 52 |
| KASUTATUD KIRJANDUS | 54 |
| LISAD | 56 |
| Lisa 1. Puuliikide lühendid (Metsa korraldamise ... 2009) | 57 |
| Lisa 2. Kõrguskõvera arvutuskäigu skeem (Kangur <i>et al.</i> 2021) | 58 |
| Lisa 3. Prt 255 aastal 2014. diameetri jaotus ja diameeter-kõrgus hajuvusdiagramm | 59 |
| Lisa 4. Prt 255 2014. aastal tehtud välitööde pilt | 60 |

TÄHISED JA LÜHENDID

| | |
|------------|---|
| V | Puistu tüvemaht ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) |
| V_1 | Puistu tüvemaht ajahetkel A_1 ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) |
| V_2 | Puistu tüvemaht ajahetkel A_2 ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) |
| i_V | Puistu tüvemahu täisjuurdekasv ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) |
| Δ_V | Puistu tüvemahu muut ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) |
| G_1 | Puistu rinnaspindala ajahetkel A_1 ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$) |
| G_2 | Puistu rinnaspindala ajahetkel A_2 ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$) |
| g | Üksikpuu rinnaspindala proovitükil (m^2) |
| g_1 | Üksikpuu rinnaspindala ajahetkel A_1 (cm^2) |
| g_2 | Üksikpuu rinnaspindala ajahetkel A_2 (cm^2) |
| H | Puistu kõrgus (m) |
| H_1 | Puistu kõrgus ajahetkel A_1 (m) |
| H_2 | Prognoositav puistu kõrgus ajahetkel A_2 (m) |
| H_i | Puistu kõrguse juurdekasv (m) |
| h | Üksikpuu kõrgus (m) |
| D | Puistu rinnasdiameeter (cm) |
| d_1 | Üksikpuu rinnasdiameeter ajahetkel A_1 (cm) |
| dg_1 | Üksikpuu ruutkeskmine diameeter ajahetkel A_1 (cm) |
| i_D | Puistu rinnasdiameetri juurdekasv (mm) |
| i_r | Keskmine aastarõnga laius (mm) |
| A_1 | Puistu vanus perioodi algul (a) |
| A_2 | Puistu vanus perioodi lõpus (a) |
| N_1 | Puude arv hektaril ajahetkel A_1 (ha^{-1}) |
| N_2 | Puude arv hektaril ajahetkel A_2 (ha^{-1}) |
| n, n_j | Vaatluste arv (tk) |
| s | Proovitüki pindala (ha) |

| | |
|----------|--|
| r | Proovitüki raadius (m) |
| B | Boniteediklass (Metsa korraldamise ... 2009) |
| G_B | Puistu rinna spindala enne hooldusraiet ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$) |
| G_A | Puistu rinna spindala peale hooldusraiet ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$) |
| N_B | Puude arv hektaril enne hooldusraiet (ha^{-1}) |
| N_A | Puude arv hektaril peale hooldusraiet (ha^{-1}) |
| \log | Naturaallogaritmi funktsioon |
| H_T | Puistu ülakõrgus hooldusraie hetkel (m) |
| SI | Puistu kõrgusindeks (m) |
| T | 1. rinde täius (%) |
| TR | Hooldusraie mõju |
| V_M | Puistu suremus (looduslik väljalangevus) |
| V_{th} | Puistu hooldusraie maht ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) |
| L | Puude hõredus proovitükil (m) |
| X | Abiparameeter |

SISSEJUHATUS

Pikaajalised ja täpsed metsade kasvukäigu prognoosid on olulised metsamajanduse kavandamisel. Sellest lähtuvalt uuriti erinevates maades kasutusel olevaid kasvukäigu mudeleid, millede täpsus tuleneb otseselt kasutada olevate andmete korrektsusest. Eestis on selliseks andmekoguks Eesti metsa kasvukäigu püsiproovitükkide võrgustik (KKPRT), kus on 2020. aasta seisuga kokku 1071 püsiproovitükki, mida on kokku 3889 korral mõõdetud.

On ilmnunud, et Eestis kasutusel olevad juurdekasvumudelid ei ole väga täpsed ning ei tööta hästi kõikide vanuste ja täiuste korral. Seetõttu vajatakse Eestis uusi võimalikult täpselt töötavaid juurdekasvu mudeleid. Esimese sammuna on käesolevas töös uuritud ja antud ülevaade tulemuslikest juurdekasvu uuringutest. Kasvukäigu modelleerimist alustatakse kõrguse kasvust, sest see on aluseks puistute boniteerimisel. Eestis on seni kasutusel keskmisest kõrgusest põhinevad mudelid ja mudelite süsteemid. Keskmise kõrguse on aga väga tundlik harvendusraiate teostamisele (Tarmu *et al.* 2020). Seega antud töös uuriti võimalusi ülakõrguse kasvu mudelite koostamiseks, mille kohta pole Eesti andmetel seni mudeleid loodud.

Käesoleva bakalaureusetöö üheks eesmärgiks oli anda ülevaade erinevatest puistu kasvukäigu mudelistest. Teiseks bakalaureusetöö eesmärgiks oli välja töötada ülakõrguse kasvukäigu (boniteerimise) modelleerimise metoodika ja esmane mudel, mis võimalikult hästi kirjeldaks Eesti metsa kasvukäigu püsiproovitükkide (KKPRT) vanus-ülakõrguse mõõtmiste andmeid. KKPRT andmestiku alusel arvutatud puistute takseerandmed ning ülakõrguse kasvu mudelid on eeltöoks puistu diameetri, rinnaspindala, tiheduse ja tagavara kasvu modelleerimiseks. Seda planeeritakse teostada käesoleva töö jätkuna magistritöö koostamisel.

Antud bakalaureusetöö on valminud RMK tellitud teadusprojekti „Puistu tagavara juurdekasvu mudeli arendamine Eesti tingimustes“ raames.

Töö autor soovib tänu avaldada oma juhendajatele Andres Kivistele, Allar Padarile ja Diana Laarmannile, kes olid suureks abiks lõputöö valmimisel.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE KASVUMUDELITEST

1.1 Norra kuusikute tüvemahu juurdekasvu mudel

2020. aastal Norra kuusepuistute (*Picea abies*) juurdekasvumudel (1) loodi tulenevalt vajadusest anda täpsemaid hinnanguid harvendamise mõjust puistu tagavara juurdekasvule (Allen II *et al.* 2020). Valem hõlmab puistu mahu, rinnaspindala, suremuse ja ülakõrguse üksikvalemeid. Mudel on loodud 94 harvendamata ja 135 harvendatud kuuse puistu püsiproovitükil mõõdetud andmete põhjal, millest kõiki on 5-10 korda üle mõõdetud (*Ibid.*). Püsiproovitükkidel on mõõdetud kõik puud, mille rinnasdiameeter on vähemalt 5 cm (*Ibid.*). Mudelpuudeks, millele on lisaks rinnasdiameetrile mõõdetud puu kõrgus ning võra alguse kõrgus, on valitud iga neljas puu (*Ibid.*). Valemites kasutatud tähiste selgitused on välja toodud peatükis Tähised ja lühendid. Antud mudelis tähistab H puistu ülakõrgust. Mudelites Allen II *et al.* (2020) poolt kasutatud parameetrite hinnangud on välja toodud tabelis 1.

$$V_2 = \beta_1 \cdot G_2^{\beta_2} \cdot H_2^{\beta_3} \cdot \exp\left(\frac{\beta_4}{A_2}\right) \quad (1)$$

Puistu mahu juurdekasvu (1) arvutamiseks tuleb esmalt leida rinnaspindala juurdekasv G_2 (1.1), milles esineb harvendamise mõju sisend TR (1.1.1):

$$G_2 = G_1^{H_1/H_2} \cdot \exp\left(\beta_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{\beta_2} \cdot \left(1 - \frac{H_1}{H_2}\right) \cdot TR\right), \text{ kus} \quad (1.1)$$

$$TR = \left(\frac{G_A}{G_B}\right)^{\beta_3 \cdot \frac{H_T}{H_2}}. \quad (1.1.1)$$

Harvendamise mõju saab väljendada kahel viisil – kui teada on puude arv enne ning peale harvendamist, saab ennustada puistu rinnaspindala peale harvendamist $\frac{G_A}{G_B}$ (1.1.1.1) või kui teada on puistu rinnaspindala enne ning peale harvendamist, saab ennustada puude arvu hektaril peale harvendamist $\frac{N_A}{N_B}$ (1.1.1.2):

$$\frac{G_A}{G_B} = \frac{\log\left(\frac{N_A}{N_B}\right) - \beta_1}{\beta_2} \text{ või} \quad (1.1.1.1)$$

$$\frac{N_A}{N_B} = \exp\left(\beta_1 + \beta_2 \cdot \left(\frac{G_A}{G_B}\right)\right). \quad (1.1.1.2)$$

Rinnaspindala juurdekasvu leidmiseks on vaja lisaks harvendamise mõjule arutada tuleviku puude arv hektaril N_2 (1.1.2) ning puistu prognoositav kõrgus H_2 (1.1.3):

$$N_2 = \left[N_1^{\beta_1} + \beta_2 \cdot \left(\frac{G_A}{G_B}\right) \cdot \left(\frac{SI_{40}}{1000}\right)^{\beta_3} \cdot (A_2^{\beta_4} - A_1^{\beta_4}) \right]^{1/\beta_5}, \quad (1.1.2)$$

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{1 - \exp(-\beta_1 A_2)}{1 - \exp(-\beta_1 A_1)} \right)^{\frac{\beta_2 + \beta_3}{X_0}}, \quad (1.1.3)$$

kus kõrguse juurdekasv sisaldab väärtust X_0 (1.1.3.1), mille leidmiseks tuleb esmalt leida L (1.1.3.2) väärtus:

$$X_0 = 0,5 \cdot (\log(H_1) + \beta_2 \cdot L + \sqrt{(\log(H_1) + \beta_2 \cdot L)^2 + 4 \cdot \beta_3 \cdot L}), \text{ kus} \quad (1.1.3.1)$$

$$L = \log(1 - \exp(-\beta_1 \cdot A_1)). \quad (1.1.3.2)$$

Tabel 1. Puistu juurdekasvu valemite parameetrid β_i

| Tähis | Valem | | | | |
|-----------|----------|---------|---------|---------|-----------|
| | V_2 | G_2 | N_2 | H_2 | N_A/N_B |
| β_1 | 0,24961 | 4,77696 | -1,0085 | 0,01605 | -1,93267 |
| β_2 | 1,15036 | 0,30957 | 0,03675 | 0,61208 | 1,92953 |
| β_3 | 1,01153 | -0,1479 | 3,76228 | 4,43722 | - |
| β_4 | 2,320398 | - | 2,5541 | - | - |
| β_5 | - | - | -1,0097 | - | - |

1.2 Läti männikute tüvemahu juurdekasvu mudel

Mudel on loodud Läti männi (*Pinus sylvestris*) ning kuuse (*Picea abies*) okaspuumetsade, mis katavad Läti metsa pindalast 53%, juurdekasvu hindamiseks (Liepa 2008). Arvutused põhinevad Läti riikliku metsateenistuse poolt 01.01.2005 avaldatud andmetel (*Ibid*). Erinevalt Allen II *et al.* (2020) juurdekasvu mudelist, toob Liepa (2008) sisse puistu suremuse teguri. Puistu mahu muut leitakse läbi puistu mahu täisjuurdekasvust puistu aastase suremuse lahutamise (2). Siin peatükis tähistab H puistu keskmist kõrgust.

$$\Delta_v = i_v - V_M \quad (2)$$

Puistu mahu täisjuurdekasvu mudel (2.1) koosneb puistu rinnaspindalast G ning täisjuurdekasvu muutujast i'_V :

$$i_V = G \cdot i'_V. \quad (2.1)$$

Rinnaspindala (2.1.1) arvutamiseks kasutab Liepa (2008) kõrguse ja vormiarvu korrutist HF :

$$G = \frac{V_1}{HF}, \quad (2.1.1)$$

$$HF = \gamma \cdot H^\alpha \cdot D^{\beta \cdot \lg H + \varphi - 2}. \quad (2.1.1.1)$$

Puistu mahu täisjuurdekasvu muutuja (2.1.2) valemi koefitsiendid on esitatud puuliigiti tabelis 3 ning valemi kuju on järgmine:

$$i'_V = 12732,4 \cdot \psi \cdot H_i^\alpha \cdot D_i^{\beta \cdot \lg H_i + \varphi - 2} \left[\frac{H_i \cdot (\alpha + \beta \cdot \lg D_i)}{H_i} + \frac{D_i \cdot (\varphi + \lg H_i)}{10 \cdot D_i} \right] \quad (2.1.2)$$

Puistu mahu potentsiaalse juurdekasvu muutuja (2.1.2) väärtuse leidmiseks tuleb esmalt arvutada puistu keskmise kõrguse H_i (2.1.2.1) ja puistu keskmise rinnasdiameetri D_i (2.1.2.2) juurdekasv:

$$H_i = \frac{2 \cdot i \cdot H(a \cdot D + b)}{c \cdot D + 100} \quad (2.1.2.1)$$

$$D_i = 2 \cdot i \cdot u \quad (2.1.2.2)$$

Mõlemas valemis esinev tunnus i on keskmine aastarõnga laius ning valemis kasutatud koefitsientide väärtused on esitatud tabelis 2.

Aastane suremus (2.2) leitakse läbi puistu rinnaspindala G läbi korrutamise aastase suremuse muutujaga V'_M . Aastase suremuse muutuja valem (2.2.1) hõlmab puistu vanust A , puistu boniteeti B (I^a boniteet $B=0$, I boniteet $B=1, \dots$, V^a boniteet $B=6$) ning valemi koefitsiente (tabel 3). Valemis kasutatud koefitsientide väärtused on määratud Läti Metsainstituudi "Silava" poolt kogutud empiiriliste andmete põhjal (Liepa 2008).

$$V_M = G \cdot V'_M \quad (2.2)$$

$$V'_M = (k_1 \cdot B + k_2) \cdot A^3 + (k_3 \cdot B + k_4) \cdot A^2 + (k_5 \cdot B + k_6) \cdot A + k_7 \cdot B + k_8 \quad (2.2.1)$$

Tabel 2. Kõrguse juurdekasvu ja koore paksuse koefitsiendid puuliigiti

| Koefitsient | Mänd | Kuusk | Koefitsient | Mänd | Kuusk |
|-------------|------------------------|----------|-------------|------------------------|------------------------|
| a | $-6,42 \cdot 10^{-2}$ | -0,0256 | a_3 | -340,743 | -430,82 |
| b | 6,356 | 1,693 | b_3 | 41,698 | 26,968 |
| c | 27,105 | 5,794 | c_3 | -1,0509 | 5,5933 |
| a_1 | $-9,462 \cdot 10^{-2}$ | -0,10341 | ψ | $1,6541 \cdot 10^{-4}$ | $2,3106 \cdot 10^{-4}$ |
| b_1 | $1,305 \cdot 10^{-2}$ | -0,01785 | α | 0,56582 | 0,78193 |
| c_1 | $1,312 \cdot 10^{-3}$ | 0,007786 | β | 0,25924 | 0,34175 |
| a_2 | 38,4359 | 43,7988 | φ | 1,59689 | 1,18811 |
| b_2 | -4,7971 | -2,5706 | u | 1,103 | 1,046 |
| c_2 | 0,13727 | -0,60422 | γ | 2,1061 | 2,9419 |

Tabel 3. Puistu aastase suremuse valemi koefitsiendid puuliigiti

| Koefitsient | Mänd | Kuusk | Koefitsient | Mänd | Kuusk |
|-------------|------------------------|-----------------------|-------------|------------------------|------------------------|
| k_1 | $-2,74 \cdot 10^{-9}$ | $1 \cdot 10^{-8}$ | k_5 | $-1,137 \cdot 10^{-4}$ | $3,82 \cdot 10^{-4}$ |
| k_2 | $-1,17 \cdot 10^{-8}$ | $-1,2 \cdot 10^{-7}$ | k_6 | $-7,178 \cdot 10^{-4}$ | $-5,378 \cdot 10^{-3}$ |
| k_3 | $1,0278 \cdot 10^{-6}$ | $-3,22 \cdot 10^{-6}$ | k_7 | $-1,076 \cdot 10^{-3}$ | $-2,21 \cdot 10^{-2}$ |
| k_4 | $4,42 \cdot 10^{-6}$ | $4,308 \cdot 10^{-5}$ | k_8 | $9,367 \cdot 10^{-2}$ | 0,2679 |

1.3 Mehhiko männikute juurdekasvu mudel

Juurdekasvu mudelid töötati välja Mehhikos Mehhiko männi (*Pinus patula*) puistute põhjal. Proovitükid varieeruvad vanuse, kasvukoha ja puistu tiheduse poolest. Kõikidel puudel mõõdeti rinnasdiameeter, kõrgused mõõdeti vähemalt 8 puul tüki kohta, millest 4 puud olid domineerivad (Santiago-García *et al.* 2017). Antud mudelites puistu kõrgus H on defineeritud kui puistu ülakõrgus. Santiago-García *et al.* (2017) poolt kasutatud parameetrite hinnangud on välja toodud tabelis 4.

Puistu esialgset mahtu V_l vanuses A_l arvutatakse töös kahel viisil. Esimene valem läheneb mahu leidmisele läbi puistu ülakõrguse H_l (3.1) ja teine valem (3.2) sisaldab puistu kõrgusindeksit SI (3.5):

$$V_l = \exp\left(\delta_0 + \delta_1 \cdot \frac{H_l}{G_l}\right) A_l^{\delta_2} \cdot H_l, \quad (3.1)$$

$$V_l = \exp(\delta_0 \cdot \log(SI) + \delta_1 \cdot A_l^{-1} + \delta_2 \cdot \log \cdot (G_l)). \quad (3.2)$$

Puistu esialgset rinnaspindala G_l leidmiseks on kaks viisi (3.3,3.4):

$$G_l = \exp\left(\beta_0 + \beta_1 \cdot A_l^{-1} + \beta_2 \cdot \log(N_l) + \beta_3 \cdot \log(H_l)\right), \quad (3.3)$$

$$G_1 = \exp\left(\beta_0 + \left(1 - \beta_1 \cdot H_1^{\beta_2}\right) \log(N_1) + \beta_3 \cdot \log(H_1)\right), \quad (3.4)$$

$$SI = 52,76080 \cdot \left[\frac{40}{A \cdot [-1 + (H/52,76080)^{-0,32193}] + 40} \right]^{3,10631}, \quad (3.5)$$

$$H = 52,76080 \cdot \left[\frac{A}{40 \cdot [-1 + (SI/52,76080)^{-0,32193}] + A} \right]^{3,10631}. \quad (3.6)$$

Puistu maht V_2 vanuses A_2 leidmiseks on esitatud kaks viisi (4.1) ja (4.2):

$$V_2 = \exp\left[\log(V_1) + \delta_1 \cdot \left(\frac{H_2}{G_2} - \frac{H_1}{G_1}\right)\right] \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\delta_2} \cdot \left(\frac{H_2}{H_1}\right), \quad (4.1)$$

$$V_2 = V_1 \exp\left[\left(\delta_1 \cdot (A_2^{-1} - A_1^{-1}) + \delta_2 \cdot \log\left(\frac{G_2}{G_1}\right)\right)\right]. \quad (4.2)$$

Puistu rinnaspindala juurdekasvu G_2 valemid (4.3) ja (4.4):

$$G_2 = \exp\left[\log(G_1) + \beta_1 \cdot (A_2^{-1} - A_1^{-1}) + \beta_2 \cdot \log\left(\frac{N_2}{N_1}\right) + \beta_3 \cdot \log\left(\frac{H_2}{H_1}\right)\right], \quad (4.3)$$

$$G_2 = \exp\left[\log(G_1) + (1 - \beta_1 \cdot H_2^{\beta_2}) \log(N_2) + (\beta_1 \cdot H_1^{\beta_2} - 1) \log(N_1) + \beta_3 \cdot \log\left(\frac{H_2}{H_1}\right)\right]. \quad (4.4)$$

Mõlemas rinnaspindala juurdekasvu valemis on üheks muutujaks tuleviku elus puude arvu hektaril N_2 , mida on võimalik arvutada kahel järgneval viisil (4.5) ja (4.6):

$$N_2 = N_1 \cdot \exp[\alpha_1 \cdot (A_2 - A_1)], \quad (4.5)$$

$$N_2 = N_1 \cdot \exp[\alpha_1 \cdot SI \cdot (A_2 - A_1)]. \quad (4.6)$$

Tabel 4. Puistu juurdekasvu valemite parameetrid β_i

| Valem | Tähis | Parameeter | Valem | Tähis | Parameeter |
|----------|------------|------------|----------|------------|------------|
| (3.1) ja | δ_0 | 2,843 | (3.2) ja | δ_0 | 0,778 |
| (4.1) | δ_1 | -1,725 | (4.2) | δ_1 | -13,580 |
| | δ_2 | 0,278 | | δ_2 | 1,072 |
| (3.3) ja | β_0 | -3,613 | (3.4) ja | β_0 | -10,712 |
| (4.3) | β_1 | -6,392 | (4.4) | β_1 | 0,095 |
| | β_2 | 0,566 | | β_2 | 0,596 |
| | β_3 | 1,149 | | β_3 | 3,722 |
| (4.5) | α_1 | -0,012 | (4.6) | α_1 | -0,00039 |

1.4 Hispaania kaasikute juurdekasvu mudel

Proovitükid, mille põhjal mudelid loodi, rajati 1997-2001 aastatel ühevanuselistesse sookase (*Betula pubescens*) ülekaaluga puistutesse. Esimesed kordusmõõtmised proovitükkidel viidi läbi 7, 9 ja 10 aastaste intervallidega. Hevia *et al.* (2015) esitasid tervikliku ja dünaamilise metsa modelleerimissüsteemi, mis järgib „GADA“ (inglise k. *Generalized Algebraic Difference approach*) lähenemisviisi, millel on eri kasvukoha headusel nii erinevad asümptoodid kui ka kõvera kuju (Cieszewski ja Bailey 2000). Hevia *et al.* (2015) enamikel dünaamilistel võrranditel on järgnev kuju (4.1) (Álvarez-González 2021):

$$Y = f(A, A_0, Y_0). \quad (4.1)$$

kus Y on funktsiooni väärtus vanuses A ja Y_0 on võrdlusmuutuja, mis on määratletud funktsiooni väärtusena funktsiooni vanuses A_0 .

Taoline struktuur võimaldab kasutada põhivõrrandeid laiemalt ja seeläbi kasutada võrrandis rohkem kui ühte kohaspetsiifilist parameetrit (Álvarez-González 2021). Álvarez-González (2021) poolt kasutatud parameetrite hinnangud on välja toodud tabelis 5 ja 6.

Puistu keskmise kõrguse leidmiseks mõõtmise hetkel kasutatakse valemit (4.2), mida on täiendatud abiparameetriga X , mis aitab arvestada kasvukoha headusega (4.3):

$$H_1 = \exp(X) \cdot \exp\left(-\frac{a_1}{X} \cdot A_1^{-a_2}\right), \quad (4.2)$$

$$X = \frac{\log(H_1) + \sqrt{\log(H_1)^2 + 4 \cdot a_1 \cdot A_1^{-a_2}}}{2}. \quad (4.3)$$

Seejärel saab arvutada tuleviku puistu keskmise kõrguse vaadeldaval ajahetkel A_2 (4.4) analoogselt puistu keskmisele kõrgusele mõõtmise hetkel:

$$H_2 = \exp(X) \cdot \exp\left(-\frac{a_1}{X} \cdot A_2^{-a_2}\right). \quad (4.4)$$

Tuleviku elus puude arvu ja puistu rinnaspindala kasvu arvutatakse nende mõõtmishetke seisuga järgi (4.5) ja (4.6):

$$N_2 = 1000 \left[\left(\frac{N_1}{1000} \right)^{1-b_3} + b_1 \frac{b_3-1}{b_2+1} \left(\left(\frac{H_2}{10} \right)^{b_2+1} - \left(\frac{H_1}{10} \right)^{b_2+1} \right) \right]^{1/(1-b_3)}, \quad (4.5)$$

$$G_2 = \left(\frac{N_2}{1000}\right)^{c_1} \left[G_1 \frac{H_1}{10} \left(\frac{N_1}{1000}\right)^{-c_1} + c_2 \left(\left(\frac{H_2}{10}\right)^{c_3+1} - \left(\frac{H_1}{10}\right)^{c_3+1} \right) / (c_3 + 1) \right] / \left(\frac{H_2}{10}\right). \quad (4.6)$$

Tabel 5. Puistu juurdekasvu valemite parameetrid

| Valem | Tähis | Parameeter |
|--------------------------|-------|------------|
| (4.2), (4.3) ja (4.4) | a_1 | 24,1140 |
| | a_2 | 0,4524 |
| (4.5) | b_1 | 0,2640 |
| | b_2 | 1,2397 |
| | b_3 | 1,4112 |
| (4.6) | c_1 | 0,1968 |
| | c_2 | 32,2611 |
| | c_3 | 1,2311 |

Lisaks puistu juurdekasvudele on vajalik arvutada juurdekasvud üksikpuu tasandil. Üksikpuu tasandil on vaja teada puu liiki, diameetrit ja kõrgust mõõtmise hetkel, läbi mille saab tuletada teisi näitajaid nagu näiteks puu mahtu, biomassi, võra muutujaid (Álvarez-González 2021). Mõõtmise ajahetke A_1 ja vaadeldava ajahetke A_2 vahel on puud kasvanud nii pikkuse kui diameetri poolest, mõned on surnud looduslike häirete tõttu (puude suremus), või metsamajanduslike tegevuste tõttu (harvendamine) ja mõned puud on juurde kasvanud (looduslik juurdekasv) (*Ibid*). Seetõttu peavad üksikpuu mudelid võtma arvesse ja analüüsima kõiki neid looduses toimuvaid protsesse (*Ibid*).

Üksikpuu suremuse mudel (4.7) sisaldab puistu rinnaspindala G_1 ja üksikpuu rinnaspindala g_1 mõõtmishetkel ning puu rinnasdiameetrit d_1 ja dg_1 , mis on ruutkeskmise diameeter ajahetkel A_1 . Antud mudel väljendab vaatluse all oleva puu ellu jäämise tõenäosust ajaperioodil $A_2 - A_1$ ehk ΔA .

$$p = \left[\frac{1}{1 + \exp\left(e_1 + e_2 \cdot d_1 + e_3 \cdot G_1 + e_4 \cdot \frac{d_1}{dg_1}\right)} \right]^{\Delta A} \quad (4.7)$$

Üksikpuu rinnaspindala juurdekasvu leidmiseks kasutatakse valemite (4.8):

$$g_2 = g_1 \left[1 + \frac{f_1 \cdot g_1^{f_2} \cdot G_1^{f_3} \cdot \exp\left(f_4 \cdot \frac{d_1}{dg_1}\right)}{g_1} \right]^{\Delta A}. \quad (4.8)$$

Üksikpuu kõrguse leidmiseks kasutatakse valemite (4.9), mis sisaldab puistu ülakõrguse valemite

(4.10):

$$h = \left(1,3^{k_1} + (H^{k_1} - 1,3^{k_1}) \cdot \left(\frac{1 - \exp(-k_2 \cdot d)}{1 - \exp(-k_2 \cdot D)} \right) \right), \quad (4.9)$$

$$H = \alpha_1 \cdot \exp(-\alpha_2 \cdot A^{-\alpha_3}). \quad (4.10)$$

Tabel 6. Üksikpuu juurdekasvu valemite parameetrid

| Valem | Tähis | Parameeter |
|--------|------------|-----------------|
| (4.7) | e_1 | -1,5181 |
| | e_2 | -0,1132 |
| | e_3 | 0,0275 |
| | e_4 | -2,3646 |
| (4.8) | f_1 | 0,0178 |
| | f_2 | 0,5943 |
| | f_3 | -0,4714 |
| | f_4 | 0,4557 |
| (4.9) | k_1 | 2,0473 |
| | k_2 | 0,0323 |
| (4.10) | α_1 | $\exp(X)$ |
| | α_2 | $\frac{a_1}{X}$ |
| | α_3 | $\frac{a_2}{X}$ |
| | | a_2 |

Viimase sammuna on vaja puistu ja üksikpuu juurdekasvu mudelid omavahel siduda läbi üksikpuu juurdekasvu mudeli väljundite kohandamisega nii, et nad vastaksid puistu puude arvu ja rinnaspindala juurdekasvu mudeli hinnangutega (Álvarez-González 2021). Tulemusena seotakse kaks erineva tasandi juurdekasvu mudelit (4.11), kus n_j tähistab puude arvu proovitükil ja s tähistab proovitüki pindala hektarites. Ülejäänud muutujad on leitavad eelnevalt välja toodud valemite abil (4.2 – 4.10).

$$g_{2_linked} = g_2 - p \left(\sum_j^{n_j} \left(p \cdot g_2 - \frac{s \cdot G_2}{10000} \right) \right) / \sum_j^{n_j} p^2 \quad (4.11)$$

1.5 Eestis kehtiv ametlik puistu juurdekasvu mudel

Eestis võeti 1999. aastal kasutusele Metsa korraldamise juhendis (2009) lisas 12 esitatud juurdekasvumudel, mis on kombineeritud eri riikide kasvukäigutabelitest. Samuti on antud mudeli sisendid, täius ja boniteet, tuletatud mudelitest, mis ei ole koostatud täielikult Eesti metsade andmetel.

Boniteediklass B lisatakse valemisse murdarvulisena, ühe kümnend-kohaga (Metsa korraldamise ... 2009). Tagavara juurdekasvu abivalemities (5.1, 5.2, 5.3) kasutatud parameetrite hinnangud on välja toodud tabelis 7.

Tagavara juurdekasv normaalpuistu korral (5):

$$Z_M^{PL} = \{\alpha \cdot \beta \cdot \chi [1 - \exp(-\beta \cdot A)]^{\chi-1} \cdot \exp(-\beta \cdot A)\} \cdot K, \text{ kus} \quad (5)$$

$$\alpha = a \cdot B + b, \quad (5.1)$$

$$\beta = (c \cdot \alpha + d)/100, \quad (5.2)$$

$$\chi = e \cdot \alpha + f. \quad (5.3)$$

Täiuseparand K arvutatakse puuliigiti erinevalt, kasutades 1. rinde puistuelemendi keskmist vanust A ja 1. rinde täiust T protsentides. Kuuse ja teiste okaspuuliikide korral kasutatakse täiuseparandi arvutamiseks valemit (5.4), ülejäänud liikide korral valemit (5.5):

$$K_{KU,TO} = \left[\left(\frac{10,44}{A} + 1,24 \right) - \left(\frac{10,44}{A} + 0,24 \right) \cdot \frac{T}{100} \right] \cdot \frac{T}{100}, \quad (5.4)$$

$$K_{TEISED} = \left[\left(\frac{1741}{A^2} + 0,87 \right) - \left(\frac{1741}{A^2} - 0,13 \right) \cdot \frac{T}{100} \right] \cdot \frac{T}{100}. \quad (5.5)$$

Juhul kui mudelit kasutatakse puistus, mille 1. rinde puistuelemendi keskmine vanus on alla 30 aasta, samastatakse vanused 30-ga ning 1. rinde täiused, mis on üle 120% 120-ga (Metsa korraldamise ... 2009).

Tabel 7. Tagavara juurdekasvu abivalemite koefitsiendid puuliigiti (puuliikide lühendid on lisas 1)

| Puuliik | Tähis | | | | | |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> | <i>e</i> | <i>f</i> |
| MA, LH, SD | -127,1 | 1225,0 | 0,0007 | 1,0952 | -0,0005 | 2,4787 |
| KU, NU, TS, TO | -145,8 | 1351,7 | 0,0005 | 1,7668 | -0,0018 | 4,9657 |
| KS, LM | -107,6 | 821,4 | 0,0011 | 1,7771 | -0,0015 | 3,2267 |
| HB, PN | -150,7 | 1057,6 | 0,0007 | 1,9665 | 0,0002 | 1,7283 |
| TA | -146,5 | 1046,5 | -0,0011 | 2,8689 | -0,0009 | 2,6105 |
| SA, JA | -156,2 | 1112,8 | 0,0001 | 1,1949 | -0,0007 | 2,1747 |
| LV, RE, VA, KP, PP, TL | -130,5 | 715,3 | -0,0023 | 5,4757 | -0,0019 | 2,8239 |

1.6 Statistilise metsainventeerimise (SMI) puistu juurdekasvu mudel

Statistilise metsainventeerimise (edaspidi SMI) käigus kogutakse inventeerimise tulemusel väikesepindalistelt proovitükkidelt, mis on paigaldatud üleriigiliselt juhuslikkust tagava süsteemiga, andmeid (Kohava 2001). Antud andmeid üldistades saadakse parameetrite hinnangud, mida omakorda kasutatakse erinevate dendromeetriliste mudelite arvutustes. Tagavara mitmekülgselt iseloomustamiseks on SMI loonud eraldi tagavara proovitükid, mis jagunevad ajutisteks (raadius 7m) ja alalisteks (raadius 10m) (*Ibid.*). Neid proovitükke mõõdetakse iga 5 aasta tagant. Esimesed üleriiklikud SMI andmed pärinevad 1999. aastast (*Ibid.*).

Alates 2016. aastast on SMI kasutanud eelnevas peatükis välja toodud Metsa korraldamise juhendi (2009) juurdekasvu mudeli asemel oma andmete põhjal loodud proovitüki tagavara (6.1) ja juurdekasvu (6.2) mudeleid (Sims 2019). Mudelites kasutatud parameetrite hinnangud ei olnud lõputöö kirjutamise ajal publitseeritud.

Puistu tüvemaht vanuses A on V (6.1), mille sisendiks on proovitüki enamuspuuliigist sõltuvad parameetri hinnangud, puistu vanus A , kõrgusindeks SI ja $OnSaar$, mille väärtus on 1 juhul kui proovitükk asub Saare-, Hiiu- või Läänemaal, vastasel juhul 0:

$$V = (a_1 + a_2 \cdot SI_{100} + a_3 \cdot OnSaar) \cdot \left(\frac{A}{A+b_1} \right)^{c_1+c_2 \cdot H_{100}}. \quad (6.1)$$

Puistu aastase mahu juurdekasvu i_V mudeli (6.2) sisendid on eelnevalt esitatud, lisandub tagavara hektari kohta muutuja V :

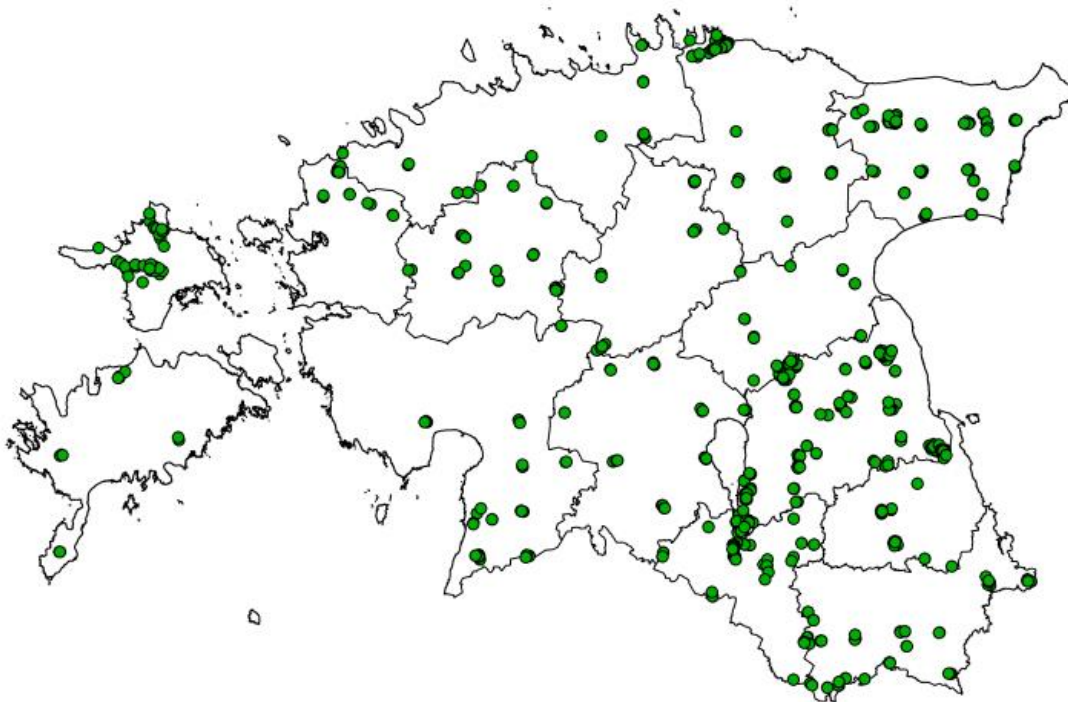
$$i_V = (a_1 + a_2 \cdot SI_{100} + a_3 \cdot OnSaar) \cdot \left(\frac{V}{A \cdot b_1 + V} \right)^{c_1}. \quad (6.2)$$

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Eesti metsa kasvukäigu püsiproovitükkide võrgustiku kirjeldus

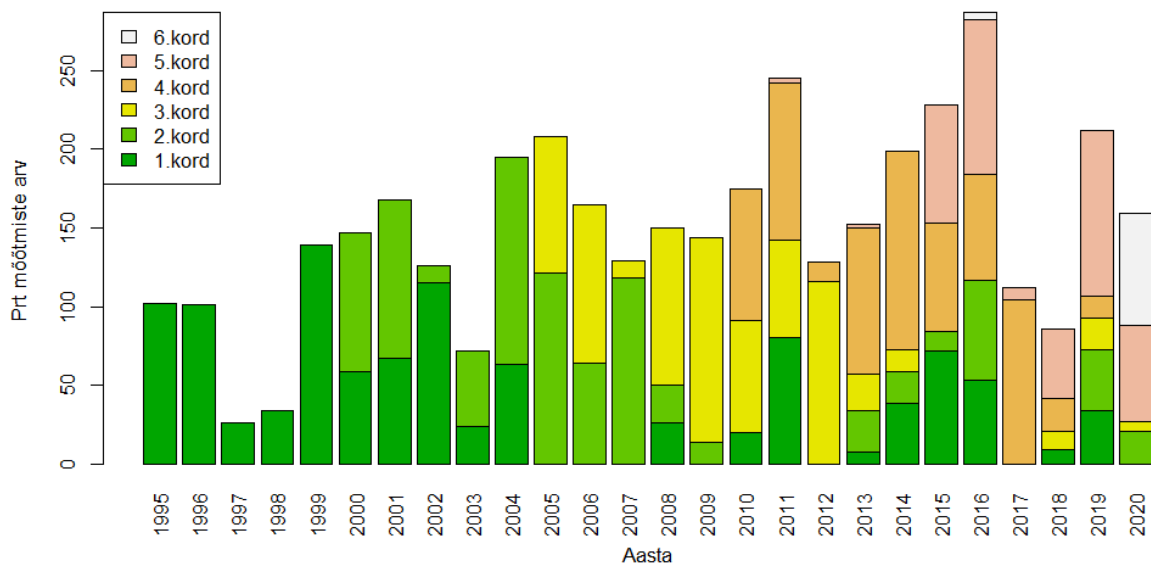
Eelpool tutvustatud dendromeetrilisi puistu kasvukäigu mudelite valideerimiseks (sobivuse hindamiseks) Eesti jaoks kasutati empiirilisi metsa mõõtmisandmeid. Üheks selliseks andmeallikaks Eestis on metsa kasvukäigu püsiproovitükkide (KKPRT) võrgustik, mille loomist alustati 1995. aastal Urmas Petersoni eestvedamisel, kui mõõdeti 300 püsiproovitükki (Kiviste *et al.* 2015a). Algselt oli andmestiku loomise ajendiks andmete kogumine üksikpuu juurdekasvu mudeli loomise jaoks, kuid nüüdseks kasutatakse kogutud andmestikku tunduvalt laialdasemalt mitmesuguste metsanduslike uurimuste ning teadustööde tegemiseks Eestis (Kiviste *et al.* 2015b).

KKPRT proovitükid on rajatud võrreldes statistilise metsainventuuri (SMI) käigus loodud metsa proovitükkidega suurema raadiusega, et mõõdetud andmete põhjal oleks võimalik kirjeldada seaduspärasusi puude kasvukäigu, puudevahelise konkurentsi ning suremuse kohta kogu puistus (*Ibid.*). Proovitükile peab jääma vähemalt 100 esimese rinde puud ning tüki raadius võib tulenevalt puistu tihedusest või muudest eripäradest varieeruda 15 kuni 30 meetrini (*Ibid.*). Olenevalt aastast viiakse läbi mõõtmised ligikaudu 150-200 püsiproovitükil (Joonis 2.2). Püsiproovitükkide rajamisel võeti eeskuju Soome tagavara püsiproovitükkide võrgustikust INKA, noorendike tagavara püsiproovitükkide võrgustikust TINKA ja turbaalade tagavara püsiproovitükkide võrgustikust SINKA (Hordo *et al.* 2006). Samuti on enamus proovitükkide asukohad osaliselt ühildatud Euroopa metsaseire programmi ICP Forest Eesti I taseme metsaseire vaatluspunktidega (*Ibid.*). Püsiproovitükkide asukohad on näidatud kaitserežiimide kaupa joonisel 2.1.



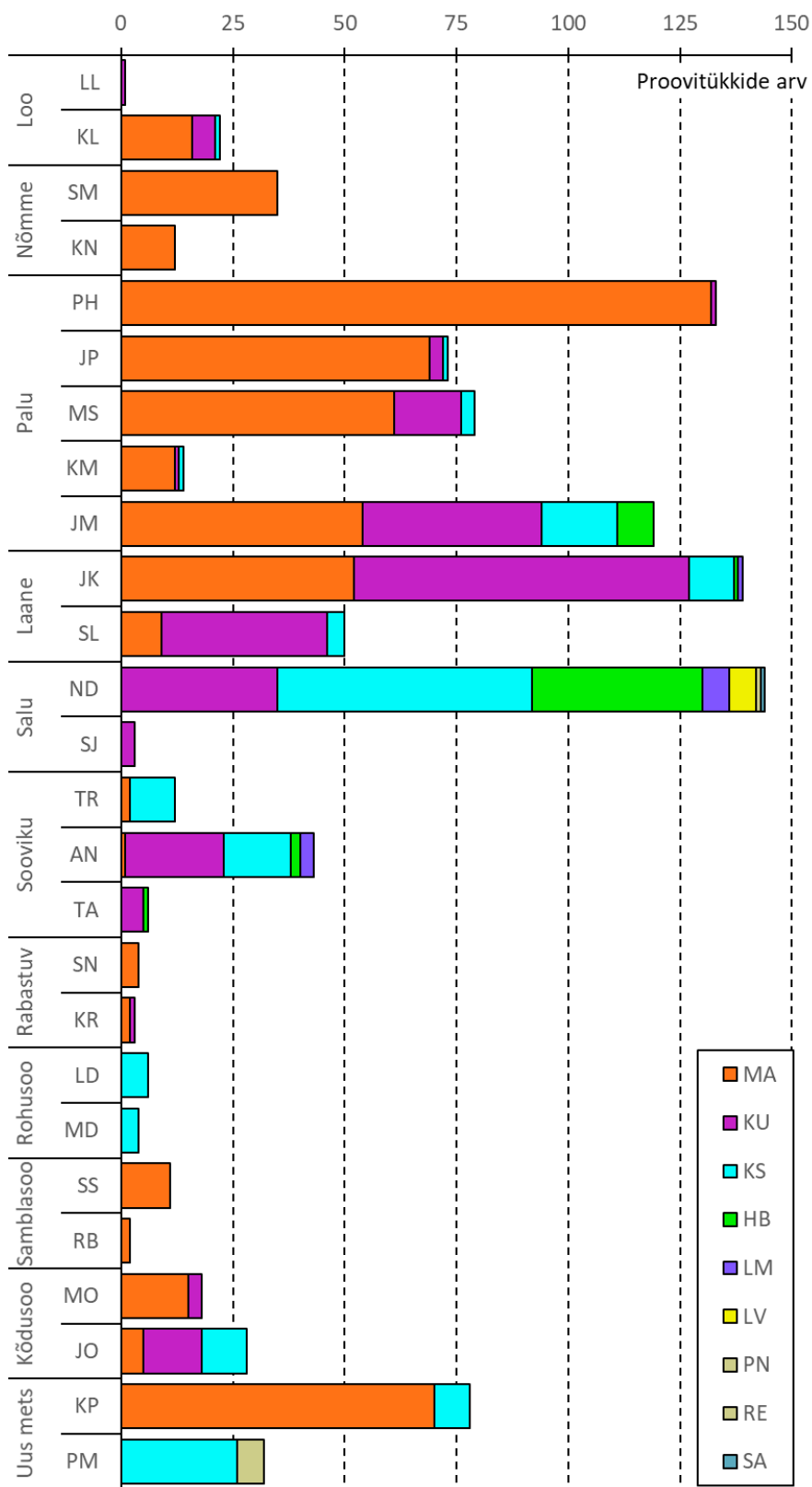
Joonis 2.1. Metsa kasvukäigu püsiproovitükkide paiknemine (1071 proovitükki).

2020. aasta seisuga on võrgustikus kokku 1071 püsiproovitükki, mida on kokku 3889 korral mõõdetud. Möödunud aastal viidi proovitükkidel kordusmõõtmised läbi 159 korral, millest 71 proovitükil toimus mõõtmine 6. korda (Joonis 2.2). Kõige rohkem kordusmõõtmiseid toimus 2016. aastal kui mõõdeti 287 proovitükki.



Joonis 2.2. Metsa kasvukäigu püsiproovitükkide mõõtmiskordade arv mõõtmisaastate lõikes.

Joonisel 2.3. on esitatud võrgustiku püsiproovitükkide jaotus enamuspuidliikide ja kasvukohatüüpide järgi. Antud töös on kasvukohatüübid rühmitatud tüübirühmadeks E. Lõhmuse (2004) eeskujul järgnevalt: loometsad (leesikaloo (*LL*), kastikuloo (*KL*)), nõmmemetsad (sambliku (*SM*), kanarbiku (*KN*)), palumetsad (pohla (*PH*), jänesekapsa-pohla (*JP*), mustika (*MS*), karusambla-mustika (*KM*), jänesekapsa-mustika (*JM*)), laanemetsad (jänesekapsa (*JK*), sinilille (*SL*), salumetsad (naadi (*ND*), sõnajala (*SJ*)), soovikumetsad (tarna (*TN*), angervaksa (*AN*), tarna-angervaksa (*TA*)), rabastuvad metsad (sinika (*SN*), karusambla (*KR*)), rohusoometsad (lodusoo (*LD*), madalsoo (*MD*)), samblasoometsad (siirdesoo (*SS*), raba (*RB*)), kõdusoometsad (mustika-kõdusoo (*MO*), jänesekapsa-kõdusoo (*JO*)). Erandina on loodud rühm „uus mets“, kuhu kuuluvad kivine puistang (*KP*) ja endine põllumajandusmaa (*PM*). Sellises jaotuses on palumetsade osakaal suur, kuna üleminekualltüübid (näiteks jänesekapsa-pohla) on sinna alla arvatud. Kõige enam asub proovitükke naadi (144), jänesekapsa (139) ja pohla (133) kasvukohatüüpides.



Joonis 2.3. Metsa kasvukäigu püsiproovitükkide jaotus enamispuuliikide ja kasvukohatüüpide järgi.

2.2 Mõõdetud andmed

Mõõtmisandmed on kogutud kahte tabelisse – ühte on kogutud proovitüki mõõtmiste üldandmed (andmestik YLD) ning teise puude mõõtmisandmed (andmestik PD). Lisaks on kasutusel andmestik PDE, mis on väljavõte andmestikust PD ja kuhu on lisatud mõned tunnused ning sisaldab vaid elusaid puid.

Andmestik YLD on andmetabel, kus on kõikide püsiproovitükkide üldandmete kõik tunnused kõigil mõõtmistel, mis on loodud andmebaasifaili *yld.dbf* põhjal. Proovitüki number (*pri*) koos mõõtmisaastaga (*aasta*) moodustavad unikaalse tunnuse, mille järgi identifitseeritakse proovitükil mõõdetud andmed. Lisaks mõõtmisaastale on igale proovitükile märgitud juurde mõõtmise kuupäev (*kuupaev*). Muutuja mõõtmiskord (*kord*) on järjekorra number, mis näitab mitmenda mõõtmisega on tegemist. Samuti on iga proovitüki juures välja toodud viimase mõõtmiskorra järjekorranumber (*mxkord*). Juhul kui proovitüki mõõtmiste kohta ilmneb mõni viga (näiteks sisestusviga), on see märgitud muutuja kontroll (*kontroll*) tunnuse alla. Andmete kontrollimiseks ja korrastamiseks on vajalik teada, kes proovitükki mõõtnud on. Juhul kui on põhjust kahelda mõnes mõõtmistulemuses, on mõõtjate eristamiseks loodud igale mõõtjale oma kood (*mtjd*). Proovitüki mõõtmisel määratakse proovitüki mõõtmisraadius (*raadius*), mis enamasti varieerub sõltuvalt proovitükil olevast puude arvust 15 kuni 30 meetrini. Kõikidel proovitükkidel on määratud puistu peapuuliik (*pev*), mis on viimase mõõtmisaasta enamuspuuliik (võetud peapuuliigiks). Puistu vanus (*vanus*) mõõtmise hetkel on arvatud puistu sünniaasta (*synd*) kaudu, täpse vanuse jaoks liidetakse kõikidele vanustele mõõtmise hetkeks aasta kasvuperioodist läbitud osa (*sess*).

Andmestik PD on andmetabel, kus on uurimuse jaoks vajalikud puude tunnused kõigil mõõtmistel. YLD ja PD andmestikud on omavahel proovitüki numbrite (*pri*) ja mõõtmisaastate (*aasta*) abil seotud. Proovitüki raadiuses mõõdetakse kõik üksikpuud ning määratakse neile number (*puu*), mis on igal proovitükil unikaalne ning tagab, et igal mõõtmiskorral mõõdetaks sama puud. Kõikidel üksikpuudel määratakse puuliigi kood (*pl*) ning rinne (*rin*) – esimene (*1*), teine (*2*), järelkasv (*J*), alusmets (*A*) või üksikpuu (*Y*). Mõne puuliigi (näiteks hariliku kuuse) puhul on võimalik eristada kahte vanusepõlvkonda – sellisel juhul määratakse väiksemaarvulise

põlvkonna rinde koodiks täht *E*. Surnud puude puhul eristatakse jalal seisvaid surnud puid (*S*), tüükaid ($h \geq 1,3$) (*T*), looduslikke kände ($h < 1,3$ m) (*L*), juurelt maha kukkunud või juurtega maast lahti olevaid puid (*M*). Juhul kui kordusmõõtmiste vahelisel perioodil on puu maha raiutud, kasutatakse rinde koodiks tähte *K*.

Kui kordusmõõtmisel ei leita numbrile vastavat puud, selle kändu ega tüügast, tähistatakse kadunud puu rinnet tähega *X*. Igal üksikpuul määratakse proovitüki tsentrist bussooliga puu asimuut (*asim*) $0,5^\circ$ astmega ning puu kaugus (*kaug*) proovitüki tsentrist 0,1 m astmega. Kõikidel üksikpuudel mõõdetakse puu rinnasdiameeter kahes suunas (*d1 ja d2*) 0,1 cm astmega (tsentri suunas ning tsentriga ristisuunas). Eraldi mõõdetakse mudelpuudel kõrgus (*h*), võra algus (*hv*) ning okaspuudel, millel mõõtjad täheldavad vähemalt 2 cm jämedusi ja 10 cm pikkuseid oksatüükaid, kuiva oksaraja alguse (*hko*) kõrgus 0,1 m astmega. Lisaks eelpool nimetatud andmetele pannakse kirja rikked (*rik*), kus on rikete koodid ja tekstid ning märkused (*markused*), kus on oluline lisateave puu kohta. Andmete eelneva kontrolli käigus loodi muutuja (*rinn*), mis on parandatud mõõtja poolt määratud rinne. Puu rinnasdiameeter (*d*) on kahes suunas mõõdetud rinnasdiameetrite aritmeetiline keskmine. Muutuja (*ed12*) on kahes suunas mõõdetud rinnasdiameetrite erinevus, mis viitab kahjustusele puu tüvel. Lisaks eelpool nimetatud mõõtmiskorra (*kord*) ja viimasele mõõtmiskorra järjekorranumbrile (*mxkord*) on PD andmestikus loodud muutuja (*maxkord*), mis on puu viimane mõõtmiskord elusana. Proovitükil on märgitud proovitüki raadius (*raadius*) ja muutuja (*ok_kaugr*), mis näitab kas puu on proovitüki raadiuse sees või mitte (*TRUE* või *FALSE*), sest mõned üksikud puud on mõõdetud ka väljaspool proovitüki fikseeritud raadiust.

Andmestik PDE on andmetabel, kus on elusate puude tunnused kõikidel mõõtmistel. Lisaks kõikidele eelpool kirjeldatud PD andmestiku struktuuridele, on elusate puude andmestikku lisatud muutujaid, mis on seotud viimase mõõtmiskorraga. Muutuja (*maxkordne*) näitab viimast mõõtmiskorda, mil puu elusaks määratud on. Muutuja (*nkorde*) näitab mitmel mõõtmisel on puu elusaks määratud. Muutuja (*minkorde*) näitab mitmendal mõõtmisel määrati puu esimest korda elusaks. (*Vrinn*) määrab puu rinde viimasel elusmõõtmisel. Kontrolliks on lisatud muutuja (*vpl*), mis on puuliigi kood viimasel elusmõõtmisel ning (*vaasta*), mis on viimane mõõtmisaasta, mil puu elusaks määrati.

2.3. Proovitüki takseertunnuste arvutamine

Lisaks kõikidele eelpool kirjeldatud YLD, PD ja PDE andmestike struktuuridele, on proovitüki takseertunnuste andmestikku juurde arvatud erinevaid takseertunnuseid.

Puistu rinnasdiameeter on puude ruutkeskmine diameeter (2.3.1). Valemite on kasutatud puu rinnasdiameetrit d , mis on kahes suunas mõõdetud rinnasdiameetrite aritmeetiline keskmine:

$$D = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}}. \quad (2.3.1)$$

Puistu kõrguskõver on leitud valemiga (2.3.2). Kui kõrguseid oli mõõdetud puistuelemendi kohta kuni 8, kasutati valemit (2.3.3). Puistu kõrguskõverad sisaldavad parameetreid a, b ja c , mille leidmist kirjeldav skeem on esitatud lisas nr 2:

$$H = 1,3 + \left(\frac{d}{a \cdot d + b}\right)^3, \quad (2.3.2)$$

$$H = 1,3 + c \cdot \left(\frac{d}{a \cdot d + b}\right)^3. \quad (2.3.3)$$

Puistutes, mille keskmine kõrgus on suurem kui 6 meetrit, on kasutatud keskmise rinnakõrguse vormiarvu F (2.3.4), mis on esitatud Metsa korraldamise juhendi (2009) lisas 11. Samas kohas on toodud ka valem puistutele, mille keskmine kõrgus on kuni 5,9 meetrit (2.3.5):

$$F = a + \frac{b}{H} + c \cdot \sqrt{H} + d \cdot \ln(H), \quad (2.3.4)$$

$$F = a + \frac{b}{H^c}. \quad (2.3.5)$$

Puistu rinnaspindalade summa leidmiseks tuleb esmalt leida puude rinnaspindalad g (2.3.6).

Puistu täius T on arvatud valemiga (2.3.8), mis sisaldab rinnaspindala hektari kohta G (2.3.7):

$$g = \pi \cdot \frac{d^2}{40000} \quad (2.3.6)$$

$$G = \sum g \cdot \frac{10000}{\pi \cdot r^2} \quad (2.3.7)$$

$$T = \frac{G}{(a_2 + b_2 \cdot H + c_2 \cdot H^2 + d_2 \cdot \sqrt{H})} \cdot 100 \quad (2.3.8)$$

Mudelites (2.3.4) ja (2.3.8) kasutatud parameetrite hinnangud on välja toodud tabelis 8 ja mudelis (2.3.5) kasutatud parameetrite hinnangud on välja toodud tabelis 9.

Tabel 8. Vormiarvu ja täiuse arvutamise mudelite parameetrid (keskmise kõrgus ≥ 6 m) (puuliikide lühendid on lisas 1)

| Kor- daja | Puuliik | | | | |
|-----------------------|------------|----------------|---------|--------------------|----------------|
| | MA, LH, SD | KU, NU, TS, TO | KS, PN | HB, LM, LV, RE, PP | TA, SA, VA, TL |
| <i>a</i> | -0,2934 | 0,9672 | -1,6715 | 0,8813 | 0,5993 |
| <i>b</i> | 4,0350 | 0,4713 | 7,5641 | -0,5950 | 0,9350 |
| <i>c</i> | -0,1204 | 0,0992 | -0,3429 | 0,0437 | 0,0286 |
| <i>d</i> | 0,3704 | -0,3109 | 1,1006 | -0,1969 | -0,1006 |
| <i>a</i> ₁ | -33,02 | -7,94 | 11,65 | 7,93 | 1,13 |
| <i>b</i> ₂ | -3,8531 | -0,5206 | 2,0183 | 1,4932 | 0,7335 |
| <i>c</i> ₂ | 0,0226 | 0,0069 | -0,0155 | -0,0076 | -0,0039 |
| <i>d</i> ₂ | 30,2955 | 10,8713 | -4,4908 | -0,9684 | 3,1637 |

Tabel 9. Vormiarvu mudelite parameetrid (keskmise kõrgus < 6 m) (puuliikide lühendid on lisas 1)

| Kor- daja | Puuliik | | | | |
|--------------|------------|----------------|---------|--------------------|----------------|
| | MA, LH, SD | KU, NU, TS, TO | KS, PN | HB, LM, LV, RE, PP | TA, SA, VA, TL |
| <i>a</i> | 0,6321 | 0,6819 | 0,5922 | 0,5964 | 0,5922 |
| <i>b</i> | 13,4558 | 55,1416 | 46,7815 | 28,1186 | 46,7815 |
| <i>c</i> | 3,3642 | 4,7457 | 4,1932 | 3,7832 | 4,1932 |

Lisaks on proovitüki takseertunnuste andmestikku lisatud puude tegelik arv proovitükil - (*N*) ja puude arv, millel on lisaks mõõdetud kõrgus (*H_N*) ning hõredus (*L*). Hõredus on puude vaheline kaugus nende ruutpaiknemise korral ja arvutatakse valemiga (2.3.9):

$$L = \frac{\pi \cdot r^2}{100 \cdot N} . \quad (2.3.9)$$

Takseertunnuste andmestikus on veel tulbad *A*, *B* ja *C*, mis sisaldavad kõrguskõvera (2.3.3) parameetrite *a*, *b* ja *c* regressioonanalüüsi käigus saadud hinnanguid (detailsed arvutusvalemid lisa 2 skeemil). Süstemaatilise nihke elimineerimiseks kasutati regressioonanalüüsil kaalufunktsiooni (2.3.10), kus *x* valitakse nii, et regressioonivõrrandi jääkide summa oleks 0. Tunnuse *x* väärtus on salvestatud andmestiku tulpa *KAAL* ning jääkide summa tulpa *JAAK* (2.3.11):

$$W = (h - 1,3)^x \quad (2.3.10)$$

$$JAAK = \sum (d - \hat{d}) \quad (2.3.11)$$

Keskmise kõrguse leidmiseks kasutati valemit 2.3.3 kusjuures valemi sisendiks oli

ruutkeskmise diameeter (2.3.1). Pärast keskmise kõrguse leidmist esimese rinde puistuelementidele ja ka puistule kokku leiti nii esimese rinde puistuelementidele kui tervele rindele kokku ülakõrgus. Ülakõrguse arvutamise aluseks on 100 jämedamat (üladiameetri) puud hektaril. Seetõttu leiti valemiga 2.3.12 esmalt proovitükile sattunud üladiameetriga (d_{ula}) puude arv (N_{ula}):

$$N_{\text{ula}} = \frac{\pi \cdot r^2}{100}. \quad (2.3.12)$$

Reeglina ei ole proovitükil ülapuude arv täisarv. Esimesele rindele kokku ja puistuelementide kaupa leiti puistu ja puistuelemendi üladiameeter (D_{ula}) valemiga 2.3.13, kusjuures k on enamikel puudel väärtusega 1 kuid kõige peenema üladiameetriga puude puhul puude arvu jäägiga (näiteks kui proovitükil on üladiameetriga puid 19,635, siis 19-ne jämedama puu puhul kasutatakse k väärtusena 1 ning jämuselt 20-nda puu puhul k väärtusena 0,635):

$$D_{\text{ula}} = \sqrt{\frac{\sum(k \cdot d_{\text{ula}}^2)}{N_{\text{ula}}}}. \quad (2.3.13)$$

Puuliikide kaupa jaotati puude arv (N_{ula}) vastavalt sellele, milliste puude diameetrid sattusid üladiameetritega puude hulka. Pärast üladiameetrite arvutamist leiti puistu esimese rinde ülakõrgused, mille arvutamisel kasutati esimesele rindele kokku (kõik esimese rinde puuliigid) leitud kõrgusekõvera parameetreid a ja b (valem 2.3.3). Enne mudeli kasutamist painutati kõrguse kõverat nii, et ülapuude puhul oleks jääkide summa 0. Selle toimingu tulemusena leiti valemile väärtus c ning kõike parameetreid (a , b ja c) ning üladiameetrit kasutades arvutati valem 2.3.3 kasutades puist esimese rinde ülakõrgus.

Lisaks leiti andmestiku tulpa SI_{100} kõrgusindeks 100 aasta vanuses puistus, aga selle arvutamine on pikemalt lahti seletatud alapeatükis 2.4 (valemid 2.4.1 ja 2.4.2).

2.4. Puistu ülakõrguse kasvukäigu modelleerimine

Puistu kasvukäigu mudelites on üheks oluliseks sisendiks kasvukoha headust iseloomustav muutuja. Parimaks peetakse kõrgusindeksit ehk boniteeti, mis peegeldab puistu tootlikust (Vaus 2004). Kõrgusindeks on defineeritud kui puistu kõrgus teatud kokkuleppelises baasvanuses.

Kõrgusindeksi baasvanust ei ole rahvusvaheliselt üheselt määratud, kuid Põhjamaades väljakujunenud põhimõtte kohaselt on kõrgusindeksiks (*Site Index*) SI_{100} , kui pole öeldud teisiti. Puistu kõrgusena kasutatakse enamuses maailma maades ülakõrgust (Tarmu *et al.* 2020), Eestis on ametlikult kasutusel Metsa korraldamise juhendis (2009) lisas 10 esitatud kõrgusindeksi ja boniteediklassi arvutamise mudel (2.4.1), (2.4.2) ja (2.4.3), mis järgib M. Orlovi boniteerimise skaala põhimõtet, millega määratakse puistu boniteediklass läbi vanuse ja keskmise kõrguse (Vaus 2004). Skaalal on kokku 7 boniteediklassi kõige tootlikumast vähim tootlikumani: I^a, I, II, III, IV, V ja V^a (*Ibid.*). Andmetöötluse raames kasutatakse boniteediklassi tähisena Araabia numbreid vastavalt I^a boniteet $B=0$, I boniteet $B=1, \dots$, V^a boniteet $B=6$. Metsa korraldamise juhendis (2009) esitatud puistu boniteedi arvutamise mudel sisaldab lähteandmetena puistu keskmist kõrgust H_1 ja puistu vanusest A_1 . Nendest lähtuvalt arvutatakse valemiga (2.4.2) kõrgusindeks SI_{50} ja sellest omakorda valemiga (2.4.1) kõrgusindeks SI_{100} . Kõrgusindeks SI_{100} on metsanduse praktikas eelistatum, sest on seotud traditsioonilise boniteediklassi numbriga B valemiga (2.4.3). Valemite (2.4.1) ja (2.4.2) parameetrite α , β ja c arvulised väärtused sõltuvad puuliigigrupist on välja toodud tabelis 10.

$$SI_{100} = \frac{SI_{50}}{[1+(\alpha+\beta \cdot SI_{50}) \cdot (0,5^c - 1)]} \quad (2.4.1)$$

$$SI_{50} = \frac{H_1 \cdot \{1 + \alpha \cdot [(50/A_1)^c - 1]\}}{\{1 - \beta \cdot H_1 \cdot [(50/A_1)^c - 1]\}} \quad (2.4.2)$$

$$B = \frac{33,5 - SI_{100}}{4} \quad (2.4.3)$$

Selleks, et mingis puistu vanuses A_1 teada oleva kõrguse H_1 andmeil prognoosida puistu boniteerimismudeliga puistu keskmist kõrgust H_2 suvalises vanuses A_2 , tuleb kõigepealt arvutada valemiga (2.4.2) kõrgusindeks SI_{50} ja alles seejärel kõrgus H_2 valemiga (2.4.4):

$$H_2 = \frac{SI_{50}}{\left(1 + (\alpha + \beta \cdot SI_{50}) \cdot \left(\left(\frac{50}{A_2}\right)^c - 1\right)\right)} \quad (2.4.4)$$

Tabel 10. Kõrgusindeksi mudelite parameetrid

| Puuliikide grupp | Kordaja | | |
|--------------------------|---------|---------|--------|
| | a | b | c |
| Mänd ja kõvad lehtpuud | 0,7283 | -0,0109 | 1,3925 |
| Kuusk ja teised okaspuud | 0,7977 | -0,0137 | 1,6116 |
| Pehmed lehtpuud | 0,7298 | -0,0161 | 1,3460 |

Läbi ajaloo on kasutatud puistu vanuse ja kõrguse sõltuvuse matemaatilisteks mudeliteks ligikaudu sadakonda erinevat funktsiooni (Kiviste *et al.* 2002). Puistu kõrguse kasvukäiku kirjeldaval funktsioonil peavad olema järgmised matemaatilised omadused: funktsioon peab läbima nullpunkti, funktsioon peab olema kasvav, funktsioonil peab olema vanuse kasvamisel lõpmatusse asümptoot, mis on paralleelne vanuse teljega, ja funktsioonil peaks olema üks käänupunkt (Elfving ja Kiviste 1997). Sellistele omadustele vastavaid matemaatilisi funktsioone nimetatakse kasvufunktsioonideks. Valik enamkasutatud metsa kasvufunktsioone on esitatud Metsandusliku Modelleerimise Infosüsteemis (FORMIS, 2021) ja neid on matemaatiliselt analüüsitud metsa kasvufunktsioonide käsiraamatus (Kiviste *et al.* 2002).

Metsanduses on tavapärane modelleerida teatud puuliigi kõrguskasvu teatud geograafilises piirkonnas (ligikaudu samasugustes kliimaatilistes tingimustes) sõltuvana vanusest ja kasvukoha headuse muutujast (kõrgusindeksist) kahemuutuja funktsiooniga (2.4.5):

$$H = f(A, SI) \quad (2.4.5)$$

kus H on puistu kõrgus vanuses A ja SI on kasvukoha headust iseloomustav parameeter.

See funktsioon kirjeldab vanus-kõrgus teljestikus s -kujuliste kõverate parve (lehvikut), kusjuures igale SI väärtusele vastab teljestikus oma kõrguse kasvukõver. Mudel (2.4.5) koostatakse sellisena, et kõrguse kasvukõverad lõikuksid ainult nullpunktis. Kui mingis vanuses A_1 on teada (mõõdetud) puistu kõrgus H_1 , siis võrrandist (2.4.5) on võimalik arvutada selle puistu kõrgusindeks SI .

Järgnevalt eeldame, et kõrgusindeksiks on SI_{100} – puistu kõrgus vanuses 100 aastat.

Käesolevas töös on eesmärgiks koostada ülakõrguse kasvukõverate süsteem valemina (2.4.5), mis võimalikult hästi kirjeldaks püsiproovitükkide andmeil koostatud vanus-ülakõrgus mõõtmisi. Sellise süsteemi koostamiseks on kolm meetodit: (1) giidkõvera meetod, (2) parameetrite prognoosimise meetod ja (3) algebraline diferentsmeetod (Elfving ja Kiviste 1997).

Lihtsaimaks võimaluseks on ülakõrguse kasvukäigu kõvera koostamine giidkõvera meetodil, mille korral mõõtmisandmete vanus-kõrgus punktivarvest pannakse läbi keskmine kõver (keskmise kõrgusindeksi SI_{100} jaoks). Tulemusena saame giidkõverale tugineva kõrguskõvera

mudeli (2.4.6):

$$H = SI_{100} \cdot \frac{f(A)}{f(100)} \quad (2.4.6)$$

kus H on puistu kõrgus vanuses A kõrgusindeksi SI_{100} korral ($f(A)$ on giidkõvera funktsioon)

Sellisel viisil saadud kõrguse kasvukäigu kõverad on omavahel võrdelised, st ühesuguse kujuga (anamorfsed). Kuigi giidkõvera meetod oli metsanduses veel pool sajandit tagasi laialdaselt kasutuses, annab see kõrguse kasvukäigust vale mudeli, kui algandmestik ei ole täiesti tasakaalus (ühepalju mõõtmisi erinevates vanuseklassides ja boniteetides) (Elfving ja Kiviste 1997).

Parameetrite prognoosimise meetodi korral lähendatakse kõigepealt iga püsiproovitüki vanuskõrgus kasvuseeria kasvukõveraga omaette (iga proovitüki jaoks saadakse valitud kasvufunktsioonile $H = f(A, a_1, a_2, a_3)$ regressioonanalüüsiga parameetritele (a_1, a_2, a_3) hinnangute komplekt) ning seejärel leitakse kasvufunktsiooni parameetritele a_1 , a_2 ja a_3 seosefunktsioonid kõrgusindeksiga SI_{100} . See meetod on kasutatav pikkade mõõtmisseeriade korral ($n > 4$), kuid KKPRT andmestiku kuni 20 aasta pikkused mõõtmisseeriad oleksid selle meetodi jaoks (arvatavasti) liiga lühikesed.

Kompromissvariandiks nende kahe meetodi vahel on algebraline diferentsmeetod, kus kõrguse kasvumudelit on võimalik koostada ka lühikeste mõõtmisseeriade andmetel. Algebralise diferentsmeetodi kasutamiseks korraldatakse püsiproovitükkide andmestik vaatlusperioodide kaupa vaatlusvektoriteks (A_1, H_1, A_2, H_2) , kus A_1 ja H_1 on puistu vanus ja kõrgus perioodi algul ning A_2 ja H_2 vaatlusperioodi lõpus. Algebralise diferentsmeetodi mudel saadakse kasvufunktsioonist $H = f(A, a_1, a_2, a_3)$ ühe parameetri asendamisega võrrandist $H_1 = f(A_1, a_1, a_2, a_3)$ (Álvarez-González 2021). Erinevate parameetrite välja vahetamise korral saadakse erinev mudel: asümptoodi parameetri (tavaliselt a_1) asendamise tulemusel tekivad ühesuguse kujuga (anamorfsed) kasvukõverad, mistahes teise parameetri (a_2 või a_3) asendamise tulemusel tekivad erikujulised (polümorfsed) kasvukõverad sama asümptoodi või erinevate asümptootidega (*Ibid.*). Diferentsmudel esitatakse üldkujul (2.4.7), mis sõltuvalt asendatavast parameetrist ja algsest kasvufunktsioonist $H = f(A, a_1, a_2, a_3)$ võib osutuda üsna pikaks ja keeruliseks.

$$H_2 = f(A_1, H_1, A_2) \quad (2.4.7)$$

Algebralise diferentsmudeli (2.4.7) parameetrite hindamiseks vaatlusandmete vektorite (A_1, H_1, A_2, H_2) andmestikul kasutati R keskkonnas mittelineaarse regressioonanalüüsi funktsiooni `nls()`. Hinnatavate parameetrite a_1, a_2, a_3 alglähendid võeti (Kiviste *et al.* 2002) käsiraamatust.

Antud lõputöö raames viidi läbi esimene ülakõrguse kasvukäigu modelleerimise katse Korfi (Korf 1939 ref Elfving ja Kiviste 1997) funktsiooniga, millele on peatükis 1.4 tutvustatud Hispaania kaasikute juurdekasvu mudel üles ehitatud. Korfi kasvufunktsiooni üldkuju on järgmine (2.4.8):

$$H = a_1 \cdot \exp(-a_2 \cdot A^{-a_3}) . \quad (2.4.8)$$

Korfi kasvufunktsiooni üldkujust (2.4.8) parameetri a_1 asendamisel funktsiooniga (2.4.9) saame algebralise diferentsvõrrandi (2.4.10), mis on ühesuguse kujuga (anamorfne) kõverate süsteem:

$$a_1 = \frac{H_1}{\exp(-a_2 \cdot A_1^{-a_3})} , \quad (2.4.9)$$

$$H_2 = H_1 \cdot \frac{\exp(-a_2 \cdot A_2^{-a_3})}{\exp(-a_2 \cdot A_1^{-a_3})} . \quad (2.4.10)$$

Álvarez-González (2021) lähenemist ülakõrguse kasvukäigu modelleerimisele läbi Korfi kasvufunktsiooni algebralise diferentsmudeli esituse on tutvustatud lähemalt peatükis 1.4.

Teine ülakõrguse kasvukäigu modelleerimise katse viidi läbi kasutades Hossfeldi IV kasvufunktsiooni (2.4.11):

$$H = \frac{a_1 \cdot A^{a_3}}{a_2 + A^{a_3}} . \quad (2.4.11)$$

Elfving ja Kiviste (1997) kasutasid Hossfeld IV (Peschel 1822 ref Cieszewski 2003) kasvufunktsiooni Rootsi männikute ülakõrguse diferentsmudeli loomiseks. Algandmeiks olid andmeseeriad, mis pärinesid Rootsi Põllumajandusülikooli 156 hariliku männi (*Pinus sylvestris*) püsiproovitükilt. Kokku oli mudeli loomiseks kasutada andmeid 453 mõõtmisperioodilt pikkusega 5-35 aastat (Elfving ja Kiviste 1997).

Anamorfse diferentsmudeli mudeli saamiseks avaldati Hossfeldi kasvufunktsiooni parameeter a_1 (2.4.12) tingimusest, et perioodi algul on puistu vanus A_I ja kõrgus H_I . Parameetrite a_2 ja a_3

hinnangud (arvulised väärtused) saadakse mittelineaarse regressioonanalüüsi nls() abil püsiproovitükkide paarismõõtmiste andmestikul:

$$a_1 = H_1 \cdot \left(\frac{a_2 + A_1^{a_3}}{A_1^{a_3}} \right). \quad (2.4.12)$$

Seejärel asendati parameeter a_1 Hossfeldi kasvufunktsiooni (2.4.13), mille tulemusena saab arvutada puistu kõrgust H_2 perioodi lõpus (vanuses A_2):

$$H_2 = \frac{H_1 \cdot (a_2 + A_1^{a_3}) \cdot A_2^{a_3}}{(a_2 + A_2^{a_3}) \cdot A_1^{a_3}}. \quad (2.4.13)$$

Teise mudelina kasutati Hossfeldi kasvufunktsioonist tuletatud polümorfset diferentsmudelit (2.4.16) (Elfving ja Kiviste 1997), mis ülevaatlikkuse mõttes on esitatud kolme erineva võrrandiga abimuutujaid d ja r kasutades (2.4.14) ja (2.4.15). Mudeli regressioonanalüüsi abil hinnatavad parameetrid on a_2 ja a_3 . Parameetri Asi väärtuseks võeti Rootsi männikute mudeli eeskujul 25 (Elfving ja Kiviste 1997).

$$d = \frac{a_2}{Asi^{a_3}} \quad (2.4.14)$$

$$r = \sqrt{(H_1 - d)^2 + 4 \cdot a_2 \cdot \frac{H_1}{A_1^{a_3}}} \quad (2.4.15)$$

$$H_2 = \frac{H_1 + d + r}{2 + \frac{4 \cdot a_2}{A_2^{a_3}}} \quad (2.4.16)$$

Antud mudeliga (2.4.14)...(2.4.16) saab luua kõrguse kasvukäigu kõverate süsteemi, kus kõverad on erineva kujuga ja erineva asümptoodiga. Parameetrite a_2 ja a_3 alglähenditeks võeti vastavalt 7000 ja 1,8 okaspuudele ning 6000 ja 1,6 lehtpuudele.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1 I rinde keskmine kõrgus ja ülakõrgus proovitükkidel

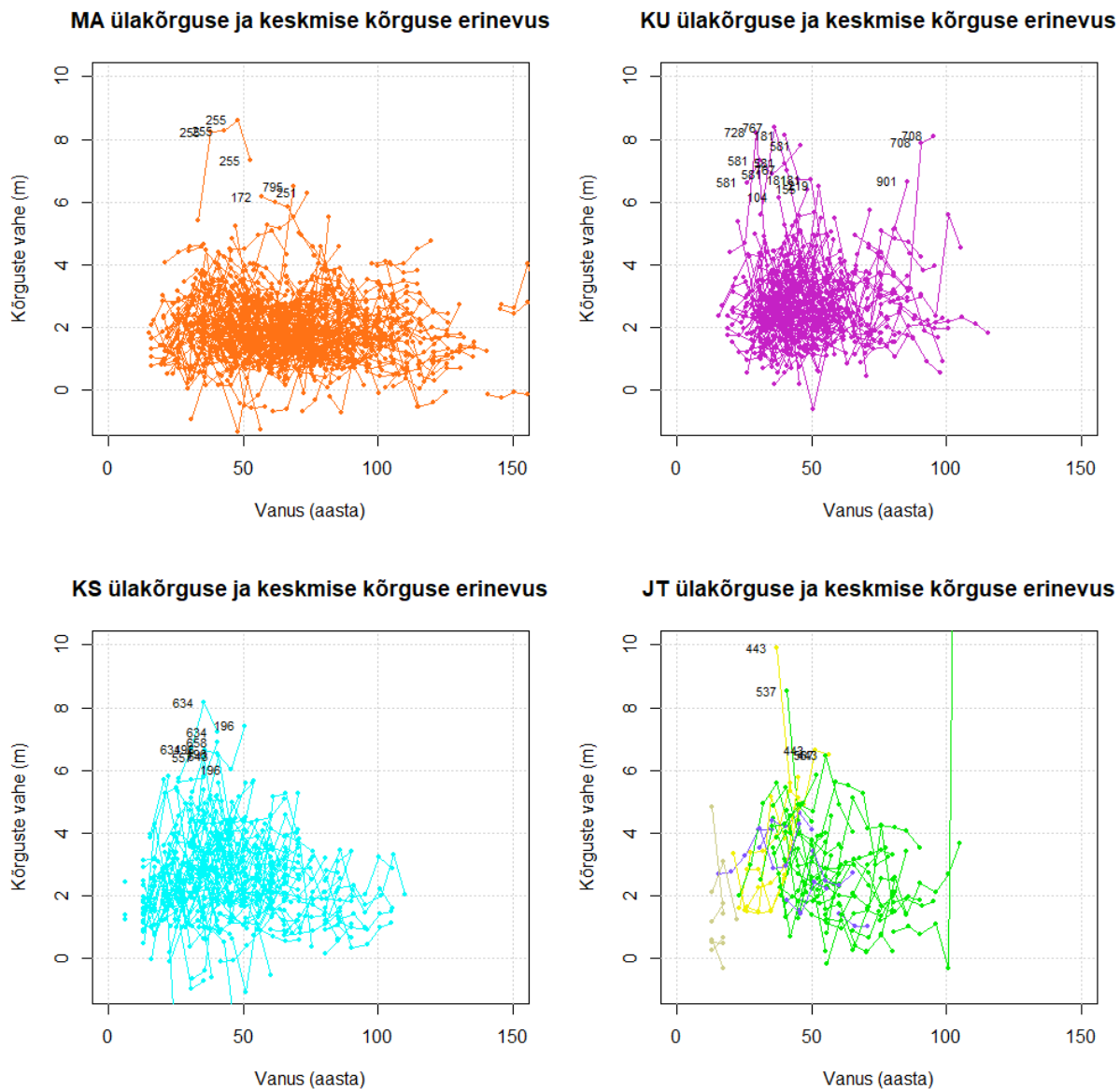
Arvutuste esmase kontrolli eesmärgil arvutati iga proovitüki mõõtmise kohta nii I rinde keskmine kõrgus kui ka ülakõrgus ning võrreldi neid omavahel. Võrdlemiseks arvutati ülakõrguse ja keskmise kõrguse vahe.

Joonisel 3.1 on esitatud ülakõrguse ja esimese rinde keskmise kõrguse vahe püsiproovitükkidel seeriatena (joonega ühendatud punktid) sõltuvana puistu vanusest. Püsiproovitükid grupeeriti peapuuliikide järgi (harilik mänd (MA), harilik kuusk (KU), kask (KS) ja teiste liikide (JT), et tekitada neljast graafikust koosnev jooniseblokk.

Joonisel 3.1. on ootuspäraselt ülakõrgus keskmiselt paar-kolm meetrit suurem kui keskmine kõrgus. Männikutes on ülakõrguse ja keskmise kõrguse erinevus pisut väiksem kui teiste peapuuliikide korral. Samuti võib täheldada, et ülakõrguse ja keskmise kõrguse erinevus vanusega mõnevõrra väheneb. Samasugused seaduspärasused ilmnesid ka Tarmu jt (2020) uurimuses.

Paraku ilmnes joonisel 3.1, et mõningatel proovitüki mõõtmistel ületas ülakõrgus keskmist kõrgust koguni enam kui kuus meetrit. Neid juhtumeid (erindeid) analüüsiti täiendavate jooniste (empiiriliste diameetri jaotushistogrammide ning diameeter-kõrgus hajuvusdiagrammide) abil. Selgus, et tegemist enamasti oli hooldamata puistutega, kus oli väga suur suhtelise diameetri varieeruvus ja diameetri jaotus positiivse asümmeetriaga.

Erisusi oli ka teistsuguseid. Männikute graafikul joonisel 3.1 eristub selgelt proovitükk 255. Selle Kiviõli tuhamäe naabruses kasvava 45 aasta vanuse loomänniku diameetrite jaotuse ja kõrgus-diameeter hajuvusdiagrammi joonistelt (esitatud lisas 3 koos proovitüki fotoga lisas 4) nähtub, et proovitükil on enamuses varieeruva jämedusega männid ja mõned jämedad ja suhteliselt kõrged kased. Nende asjaolude kokkulangemise tõttu tekibki antud proovitükil väga suur üla- ja keskmise kõrguse erinevus.



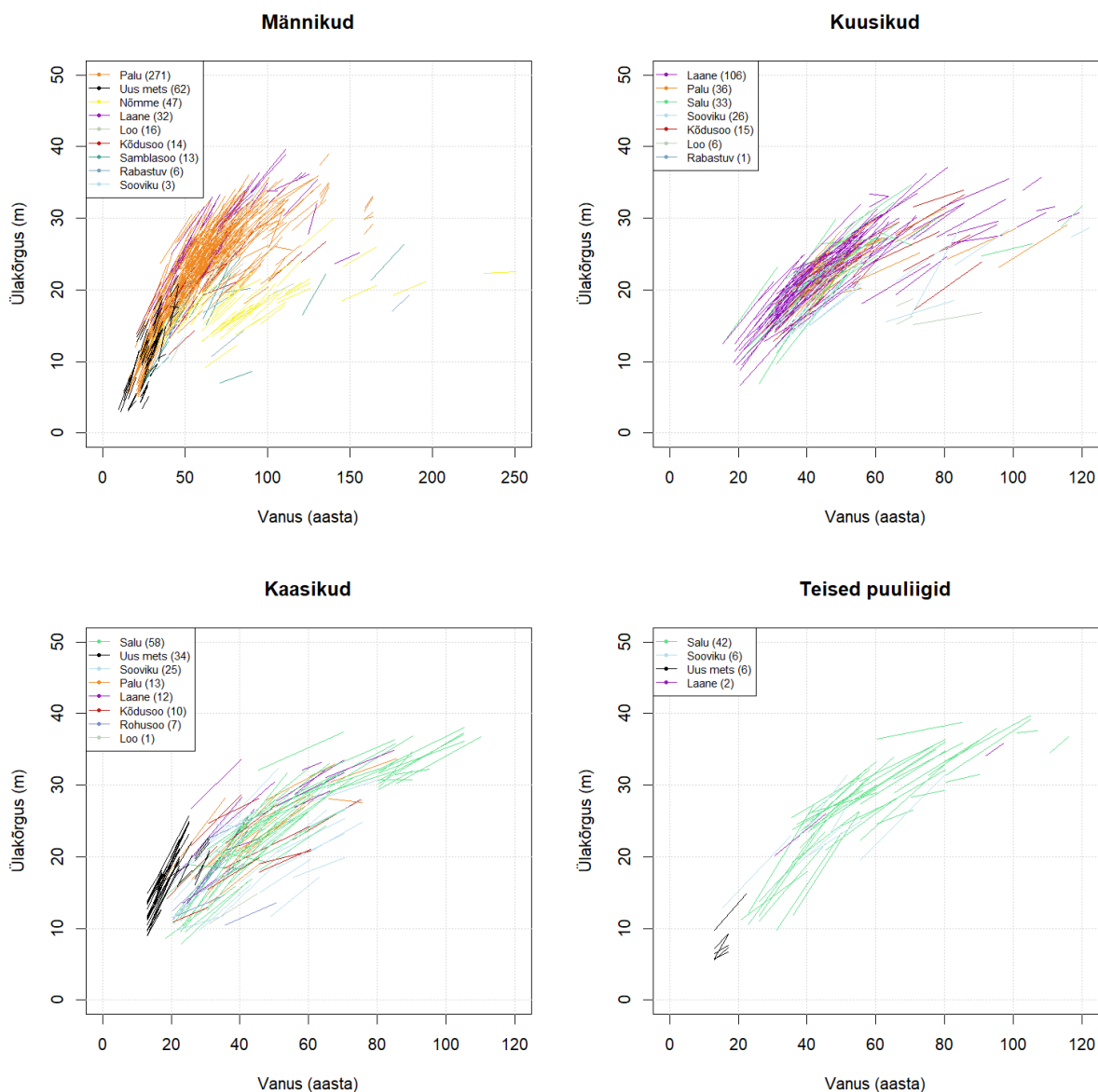
Joonis 3.1. Proovitükkide ülakõrguse ja keskmise kõrguse vahe sõltuvalt vanusest peapuuliikide järgi grupeerituna. Sama püsiproovitüki mõõtmised erinevatel aastatel on ühendatud joonega. Erindmõõtmisele on lisatud proovitüki number.

3.2 Puistu ülakõrguse ja vanuse mõõtmispaarid

Puistu kõrguse kasvukäigu modelleerimisel algebralise diferentsmudeli meetodil on vaja püsiproovitükkide andmed korraldada mõõtmispaaridena, kus on proovitüki takseertunnused teatud perioodi algul ja lõpul. Enamusel proovitükkidest on mõõtmisi tehtud iga viie aasta järel

kuni 25 aasta jooksul. Käesolevas töös võeti perioodi alguseks esimene ning perioodi lõpuks viimane mõõtmise. Sellega saadi iga püsiproovitüki mõõtmisandmeist maksimaalse perioodi pikkus (4...25 aastat).

Joonisel 3.2 on esitatud 903 püsiproovitüki mõõtmispaaride andmed vanus-ülakõrgus teljestikus.



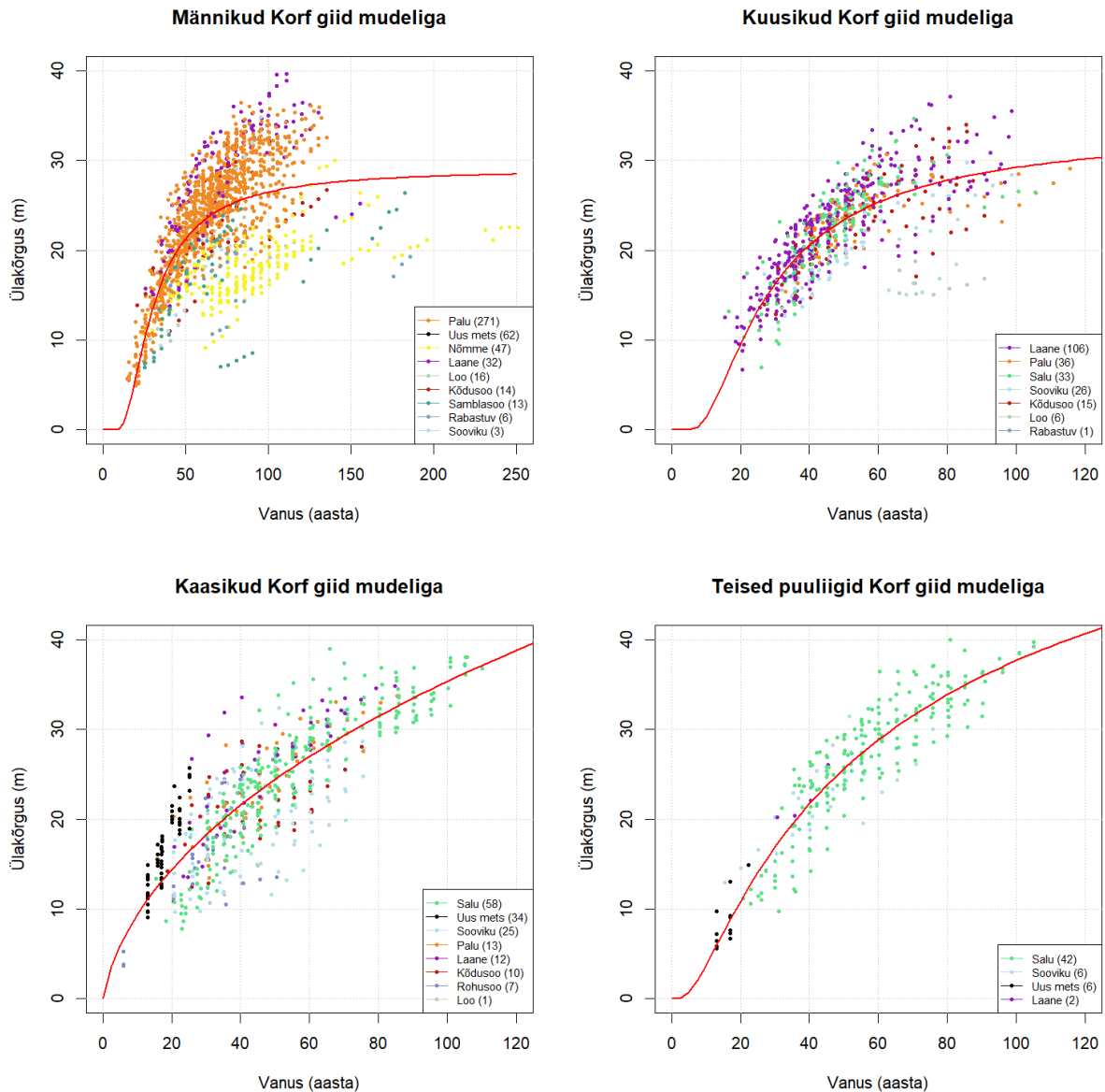
Joonis 3.2. Püsiproovitükkide ülakõrgus ja vanuse mõõtmispaaridena peapuuliigi ja kasvukohatüübi rühmade järgi.

Joonisel 3.2 on ülakõrguse muutus kahe mõõtmise vahelise perioodi jooksul püsiproovitükkidel üldiselt ootuspärane: perioodi jooksul kõrgus kasvas, seejuures noores eas intensiivsemalt kui vanas eas. Tähelepanelikul vaatlemisel on siiski märgata üksikuid mõõtmispaare, kus perioodi jooksul ülakõrgus kas väheneb või liialt järsku kasvab. Sellised olukorrad võivad tekkida siis, kui mõõtmiste vahelisel perioodil on tehtud raieid, juhtunud tugevaid häiringuid (tuulemurrud) ja/või proovitüki raadiust on suurendatud. Metoodika testimise eesmärgil jäeti antud töös sellised erisused siiski andmestikku.

3.2.1 Puistu ülakõrguse kasvukäigu mudel Korfi funktsiooniga

Käesolevas töös kasutati ülakõrguse kasvukäigu modelleerimiseks kaht kasvufunktsiooni (Korfi ja Hossfeld IV funktsioone). Mõlema funktsiooni baasil loodi puistu boniteerimist võimaldavad mudelid giidkõvera meetodil, samakujuliste kasvukõverate diferentsmeetodil (ADA) ja erikujuliste ning erimevate asüptootidega kasvukõverate diferentsmeetodil (GADA). Korfi funktsioon valiti baasfunktsiooniks rahvusvahelises metsa kasvukäigu teemalisel veebiseminaril esitatud verivärskel uurimisel (Alvarez-Gonzalez 2021) soovitusel.

Giidkõvera meetodil leiti proovitükkide vanus-ülakõrgus andmepunktide parve põhjal puistu ülakõrguse seos puistu vanusega Korfi funktsiooniga vabavara R mittelineaarse regressioonanalüüsi `nls()` abil. Punktisarve suure hajuvuse tõttu oli probleeme kaasikute andmestiku parameetritele sobivate algühendite leidmisega. Seetõttu lähendati kaasikute puhul mitte vanus-ülakõrgus andmepunkte vaid viieaastase vanuseintervalliga koostatud rühmade keskmiste rida. Korfi funktsiooni (2.4.8) parameetrite hinnangud ja mudeli headust iseloomustav jääkstandardhälve on esitatud alapeatüki lõpus tabelis 11. Joonisel 3.3 on esitatud proovitükkide mõõtmiste ülakõrguse ja vanuse punktisarve taustal Korfi funktsiooni giidkõver männikute, kuusikute, kaasikute ja teiste peapuuliikide andmeil.



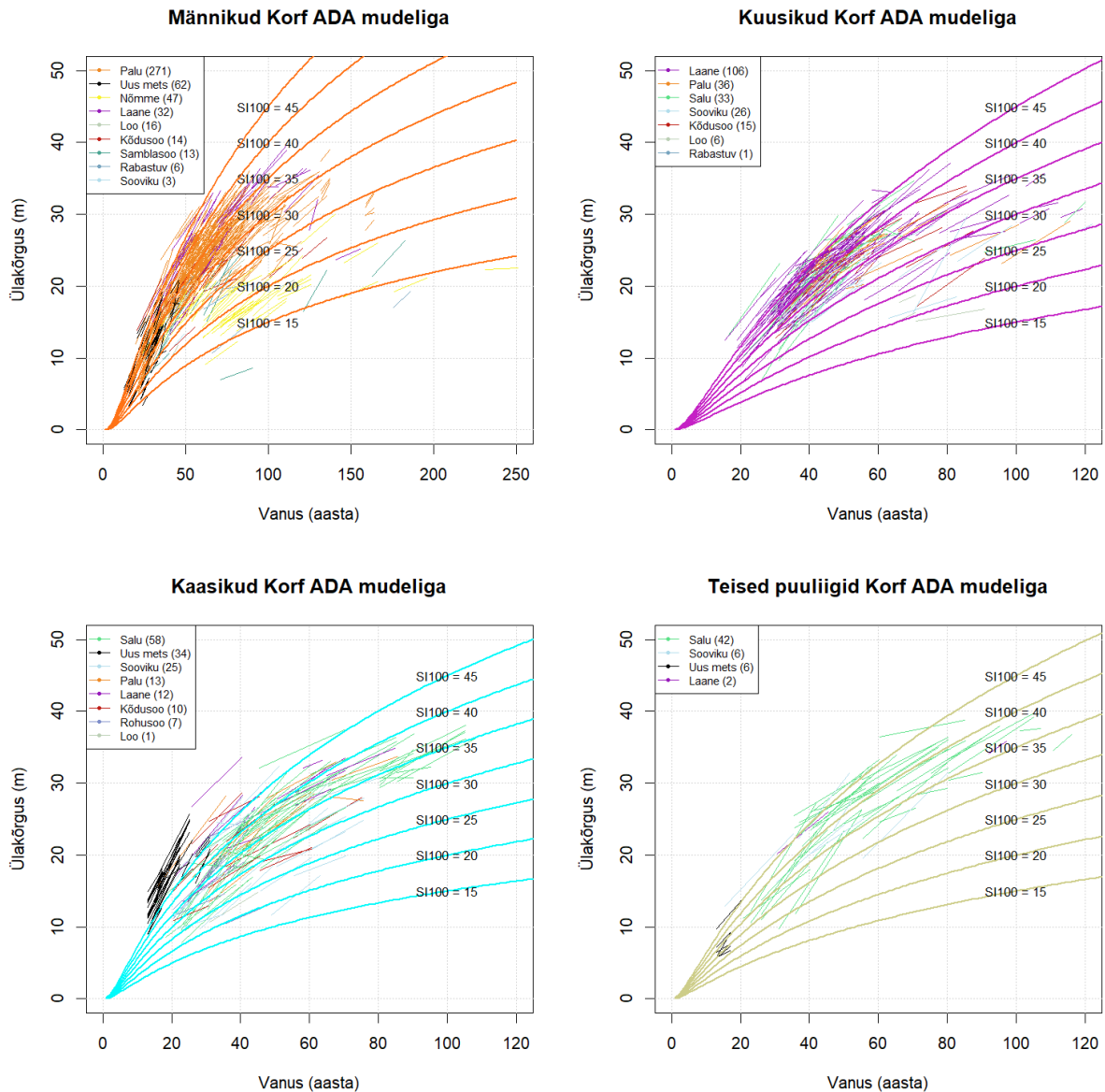
Joonis 3.3. Korfi funktsiooni giidkõver ja proovitükkide ülakõrguse ja vanuse seos peapuuliigi ja kasvukohatüübi gruppide järgi.

Korfi funktsiooni giidkõvera mudel ei sobi kõrguse kasvukäigu kirjeldamiseks. Giidkõver kirjeldab valimi ülakõrguse keskmise sõltuvust vanusest. Paraku ei ole KKPRT proovitükkide valim tasakaalus (st andmestikus ei ole ühepalju mõõtmisi erinevates vanuseklassides ja boniteediklassides), mistõttu annab giidkõver kõrguse kasvukäigust (eriti männikute puhul) üsna vale trendi.

Omavahel võrdeliste kõverate süsteem tekib „ADA“ (inglise k. *Algebraic Difference Approach*) lähenemisviisil, millel on eri headusega kasvukohtadel kõrguse kasvufunktsioonil erinevad asümptoodid, kuid ühesugune kujuga (anamorfsed) kõverad. Korfi funktsiooni ADA mudeli (2.4.10) parameetrid hinnati ülakõrguse ja vanuse mõõtmispaaride andmestikul. Parameetrite hinnangud ja mudeli headust iseloomustav jääkstandardhälve on esitatud alapeatüki lõpus tabelis 11. Joonisel 3.4 on esitataud proovitükkide vanuse ja ülakõrguse vahelist seost (murdjoontega) ning Korfi funktsiooni samakujuliste kõverate süsteem (joontega).

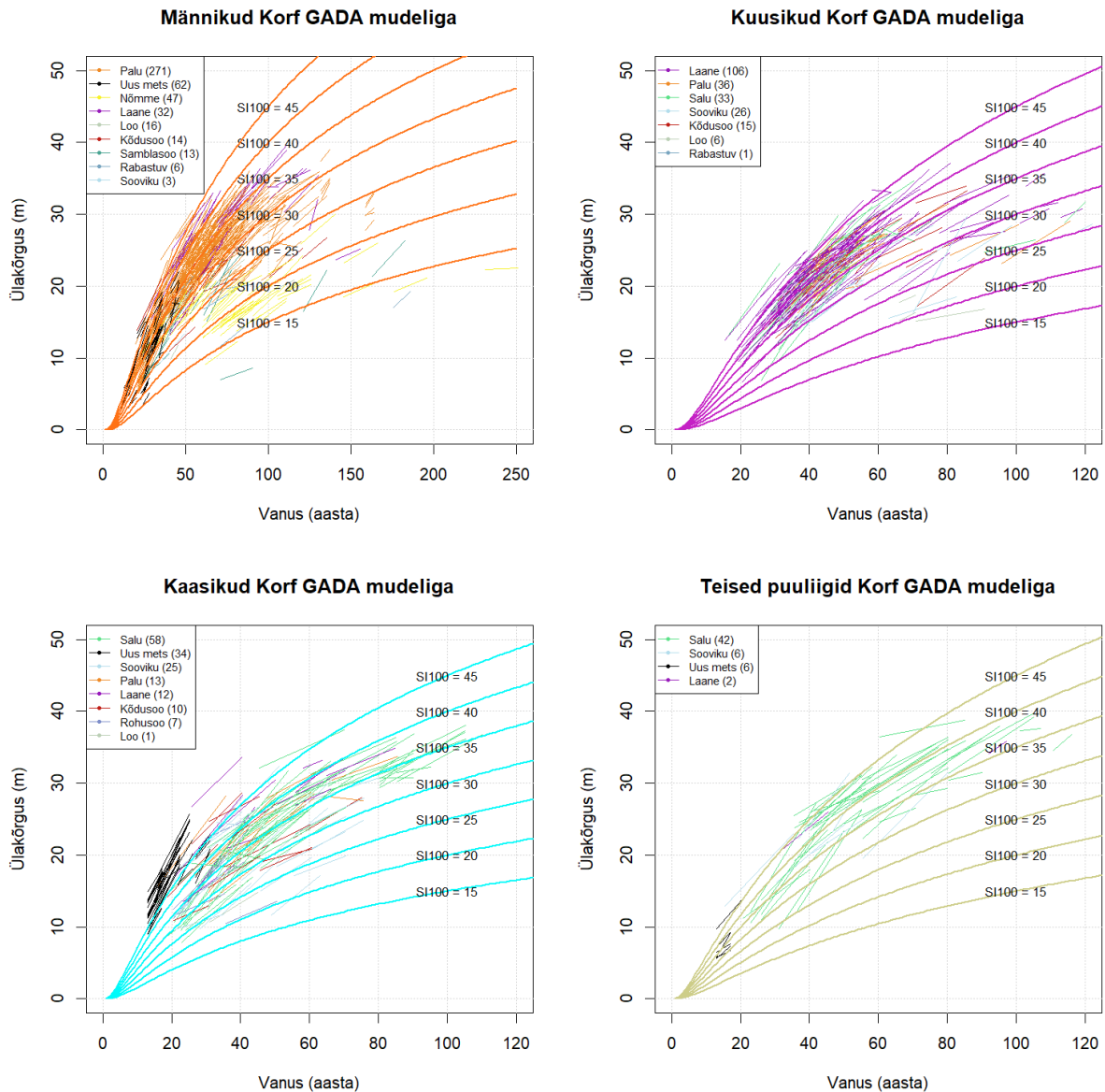
Jooniselt 3.4 on näha, et Korfi diferentsmudel sobib ülakõrguse empiirilise kasvukäiguga tunduvalt paremini kui giidkõvera mudel. Täpsemal vaatlusel siiski nähtub, et samakujuliste kõverate süsteem ikkagi ei sobi ülakõrguse empiirilise kasvukäiguga proovitükkidel erinevate viljakusega kasvukohtades (boniteetides). Antud mudel ei sobi kõrguse kasvukäigu prognoosimiseks, kuna prognoositud ülakõrgused ulatuvad vanemas eas puistutes kohati üle 50 m, mis ei ole Eesti tingimustes ootuspärane.

Polümorfne kõverate süsteem tekib „GADA“ (inglise k. *Generalized Algebraic Difference Approach*) lähenemisviisil, millel on eri headusega kasvukohtadel erinevad asümptoodid ja erineva kujuga (polümorfsed) kõverad. Korfi funktsiooni GADA mudeli (4.3) ja (4.4) parameetrid hinnati ülakõrguse ja vanuse mõõtmispaaride andmestikul. Parameetrite hinnangud ja mudeli headust iseloomustav jääkstandardhälve on esitatud alapeatüki lõpus tabelis 11. Proovitükkide vanuse ja ülakõrguse vahelist seost (murdjoontena) ning Korfi funktsiooni polümorfne kõverate süsteem (joontega) on esitatud joonisel 3.5.



Joonis 3.4. Korfi ADA funktsiooni (2.4.10) samakujuliste kõverate süsteem ja proovitükkide ülakõrguse ja vanuse seos peapuuliigi ja kasvukohatüübi gruppide järgi.

Sarnaselt Korfi funktsiooni anamorfsele kõverate süsteemile ei sobi ka Korfi funktsiooni polümorfne kõverate süsteem üldise kasvukäigu prognoosimiseks, kuna prognoositud ülakõrgused on Eesti tingimustes liiga suured.



Joonis 3.5. Korfi GADA funktsiooni (4.3 ja 4.4) erikujuliste ja erinevate asümptootidega kõverate süsteem ja proovitükkide ülakõrguse ja vanuse seos peapuuliigi ja kasvukohatüübi gruppide järgi.

Sarnaselt Korfi ADA funktsiooni samakujuliste kõverate süsteemile ei sobi ka Korfi GADA funktsiooni erikujuliste kõverate süsteem ülakõrguse kasvukäigu prognoosimiseks, kuna prognoositud ülakõrgused on Eesti tingimustes liiga suured. Üleüldse, Korfi funktsiooni ADA ja GADA kõverate süsteemid on väga lähedased, mis viitab Korfi funktsiooni parameetrite vahelise seose sobimatusele Eesti tingimustes.

Tabel 11. Korfi funktsiooni mudelite parameetrite hinnangud (puuliikide lühendid on lisas 1)

| Mudel | Puuliik | a_1 | a_2 | a_3 | Jääkstandardhälve |
|-------------------|---------|----------|----------|----------|-------------------|
| Korfi giidkõver | MA | 28,97081 | 333,6388 | 1,784267 | 4,842790575 |
| Korfi giidkõver | KU | 33,73634 | 71,66765 | 1,348928 | 3,237362226 |
| Korfi giidkõver | KS | 7272,283 | 8,322518 | 0,096913 | 3,909820127 |
| Korfi giidkõver | JT | 75,59651 | 13,064 | 0,636537 | 3,016313297 |
| Korfi ADA meetod | MA | - | 11,46062 | 0,45694 | 1,797727533 |
| Korfi ADA meetod | KU | - | 8,896427 | 0,341478 | 2,29059271 |
| Korfi ADA meetod | KS | - | 7,520316 | 0,377119 | 2,728354319 |
| Korfi ADA meetod | JT | - | 7,829907 | 0,315321 | 3,36811431 |
| Korfi GADA meetod | MA | 61,19388 | 0,518114 | - | 1,686530532 |
| Korfi GADA meetod | KU | 50,54662 | 0,463552 | - | 2,177480258 |
| Korfi GADA meetod | KS | 39,0768 | 0,465337 | - | 2,586908734 |
| Korfi GADA meetod | JT | 43,57976 | 0,409265 | - | 3,204045726 |

3.2.2 Elementide ülakõrguse ja vanuse seos Hossfeld IV funktsiooniga

Korfi funktsiooni baasil ei õnnestunud saada rahuldavat ülakõrguse kasvukäigu mudelit. Seetõttu katsetati Eesti andmetel Elfving ja Kiviste (1997) Rootsi männikute ülakõrguse modelleerimise meetodit.

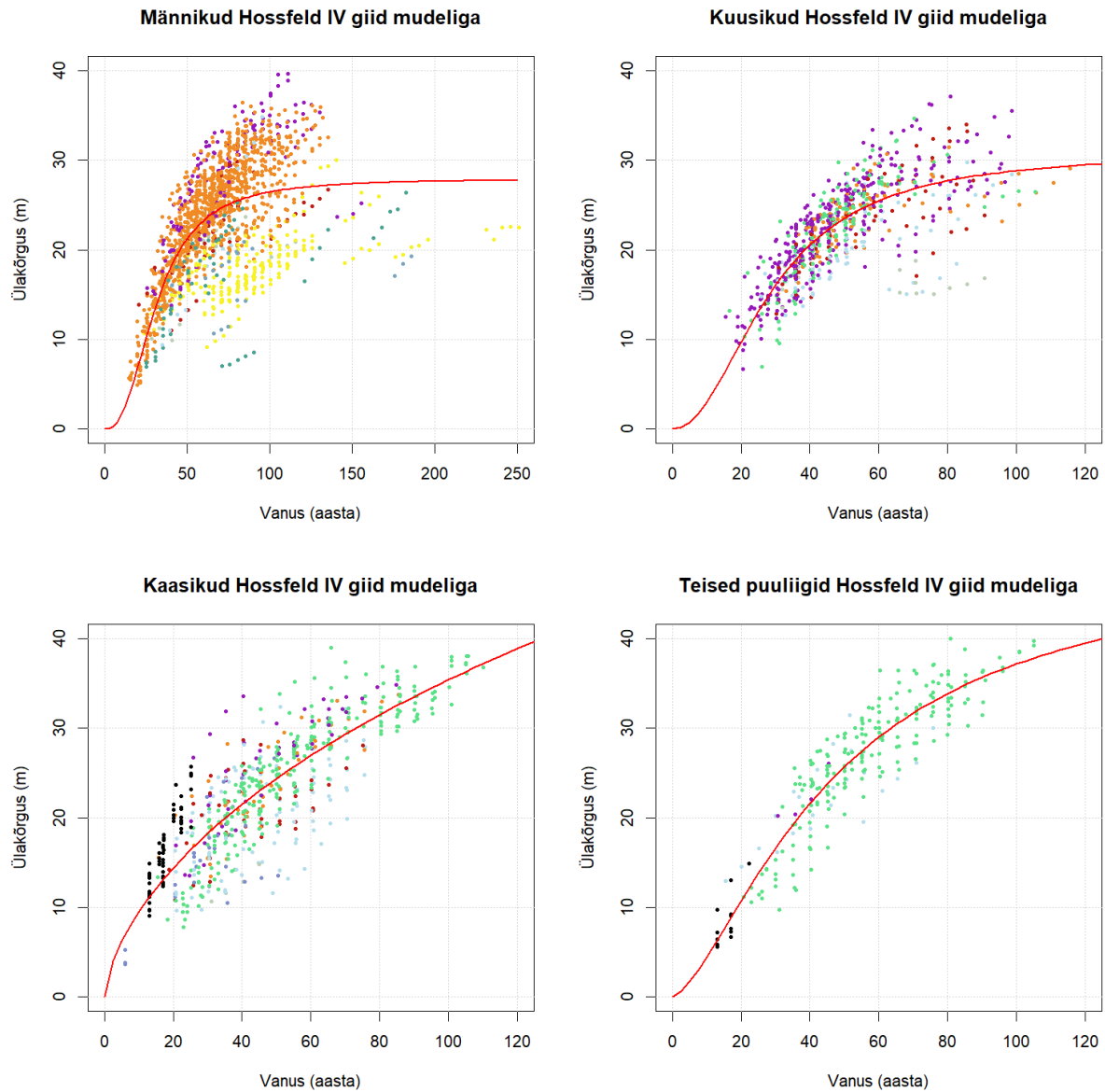
Nii nagu Korfi funktsiooni korral, alustati ka Hossfeld IV funktsiooni korral giidkõvera mudelist (2.4.11). Parameetrite alg lähenditeks võeti Elfvingu ja Kiviste (1997) parameetrite hinnangud. Ka Hossfeld IV giidkõvera mudel ei koondunud kaasikute proovitükkide vanus-ülakõrgus punktisarve lähendamisel, mistõttu tuli kaasikute mudeli parameetrid hinnata keskmiste ülakõrguste vanuseridadel. Mudeli parameetrite hinnangud ja mudeli headust iseloomustav jääkstandardhälve on esitatud alapeatüki lõpus tabelis 12. Joonisel 3.6 on esitatud proovitükkide vanuse ja ülakõrguse vahelist seost (punktidenä) ning Hossfeldi funktsiooni giidkõverana (joonega).

Võrreldes giidkõverate jääkstandardhälbeid tabelites 11 ja 12 selgub, et giidkõvera jääkstandardhälve on mõlema baasfunktsiooni korral peaaegu ühtmoodi väga suur. Samuti on mõlema giidkõvera graafikud joonistel 3.3 ja 3.6 ligilähedased ja sobimatud puistu ülakõrguse kasvukäiguga püsiproovitükkidel. Seega on tegemist giidkõvera meetodi üldise sobimatusena puistu kasvukäigu kirjeldamiseks tasakaalustamata andmestiku korral.

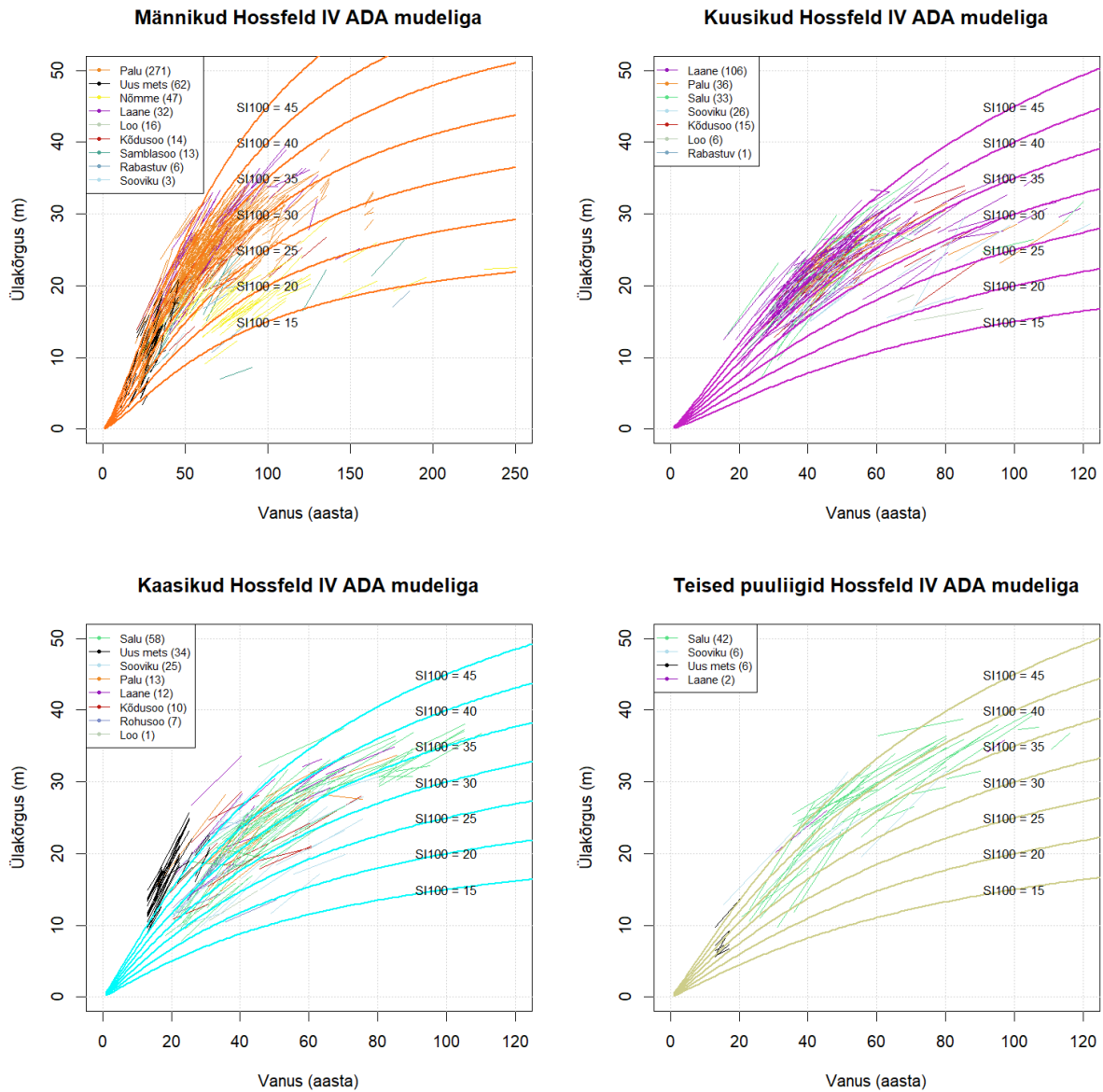
Hossfeld IV funktsiooni põhjal koostatud samakujuliste kõverate ADA mudeli (2.4.13) parameetrite hinnangud ja mudeli headust iseloomustav jääkstandardhälve on esitatud alapeatüki lõpus Tabelis 12. Proovitükkide ülakõrguse kasvukäik ning Hossfeldi funktsiooni anamorfne kõverate süsteem (joontega) on esitatud joonisel 3.7.

Jooniselt 3.7 on näha, et kuigi Hossfeld IV ADA mudel (2.4.13) on mõnevõrra madalamate asümptootidega kui Korf ADA mudel, annab ka see mudel viljakamates kasvutingimustes lubamatult kõrgeid ülakõrguse prognoose puistu kõrges vanuses.

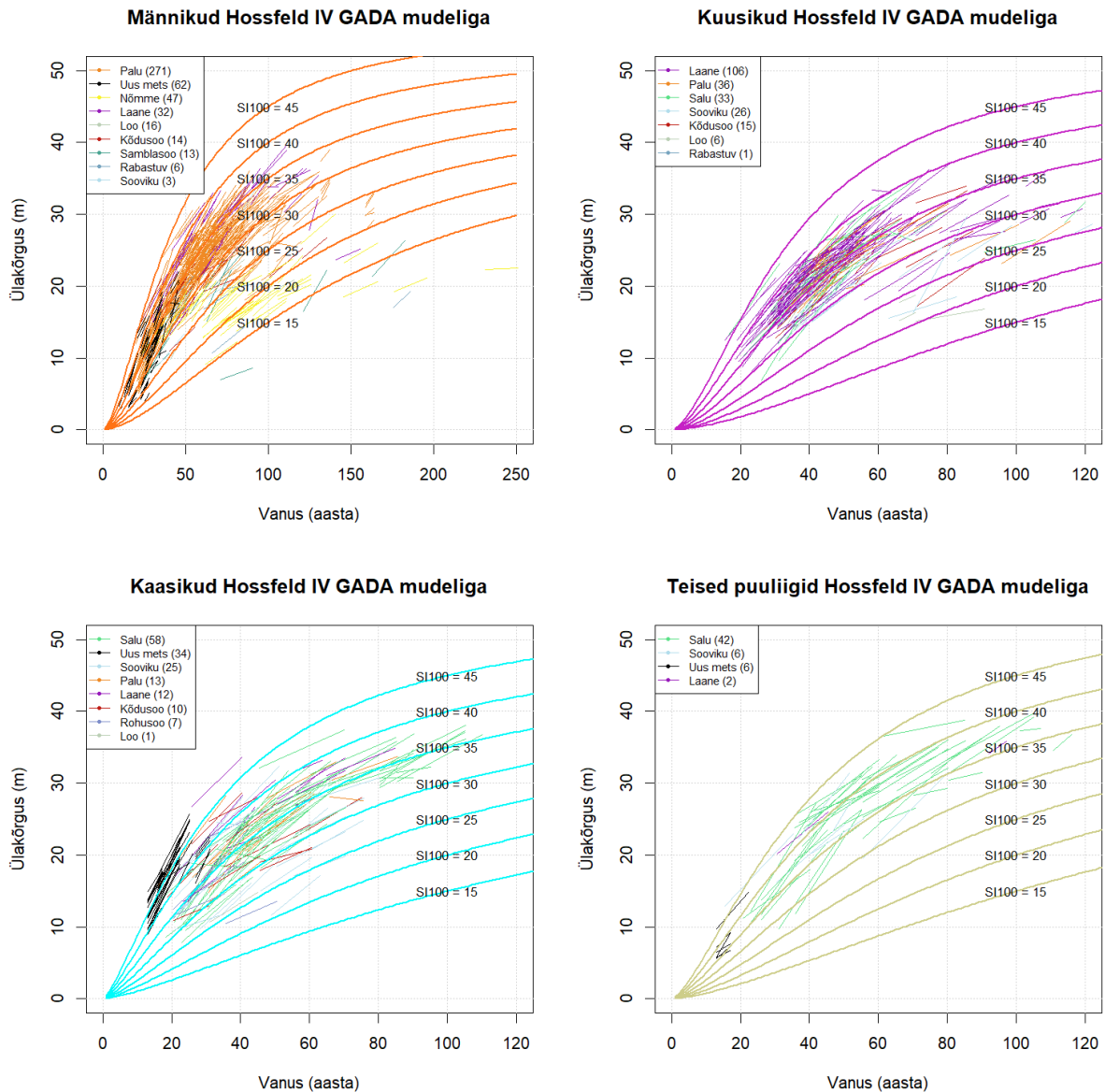
Hossfeld IV funktsiooni põhjal koostatud erikujuliste kõverate ja erinevate asümptootidega GADA mudeli (2.4.14), (2.4.15), (2.4.16) parameetrite hinnangud ja mudeli headust iseloomustav jääkstandardhälve on esitatud alapeatüki lõpus tabelis 12. Joonisel 3.8 on kujutatud proovitükkide vanuse ja ülakõrguse vahelist seost ja kõverate süsteem.



Joonis 3.6. Hossfeld IV funktsiooni giidkõver (2.4.11) ja proovitükkide ülakõrguse ja vanuse seos peapuuliigi ja kasvukohatüübi gruppide järgi.



Joonis 3.7. Hossfeldi funktsiooni anamorfne kõverate süsteem ja proovitükkide ülakõrguse ja vanuse seos puuliikide ja kasvukohatüüpide järgi.



Joonis 3.8. Hossfeldi funktsiooni polümorfne kõverate süsteem ja proovitükkide ülakõrguse ja vanuse seos puuliikide ja kasvukohatüüpide järgi.

Tabelites 11 ja 12 esitatud jääkstandardhälvete võrdlemisel selgus, et Hossfeld IV GADA mudel on väikseimate jääkstandardhälvetega. Veelgi tähtsam on joonisel 3.8 nähtav ülakõrguse kasvukäigu kõverate süsteemi kuju, mis annab puistu kõrges vanuses tunduvalt ootuspärasemad prognoosid kui teised mudelid. Tundub, et Rootsi männikute kasvukäigu seaduspärasused sobivad ka Eesti tingimustesse.

Tabel 12. Hossfeldi funktsioonide mudelite parameetrite hinnangud (puuliikide lühendid on lisas 1)

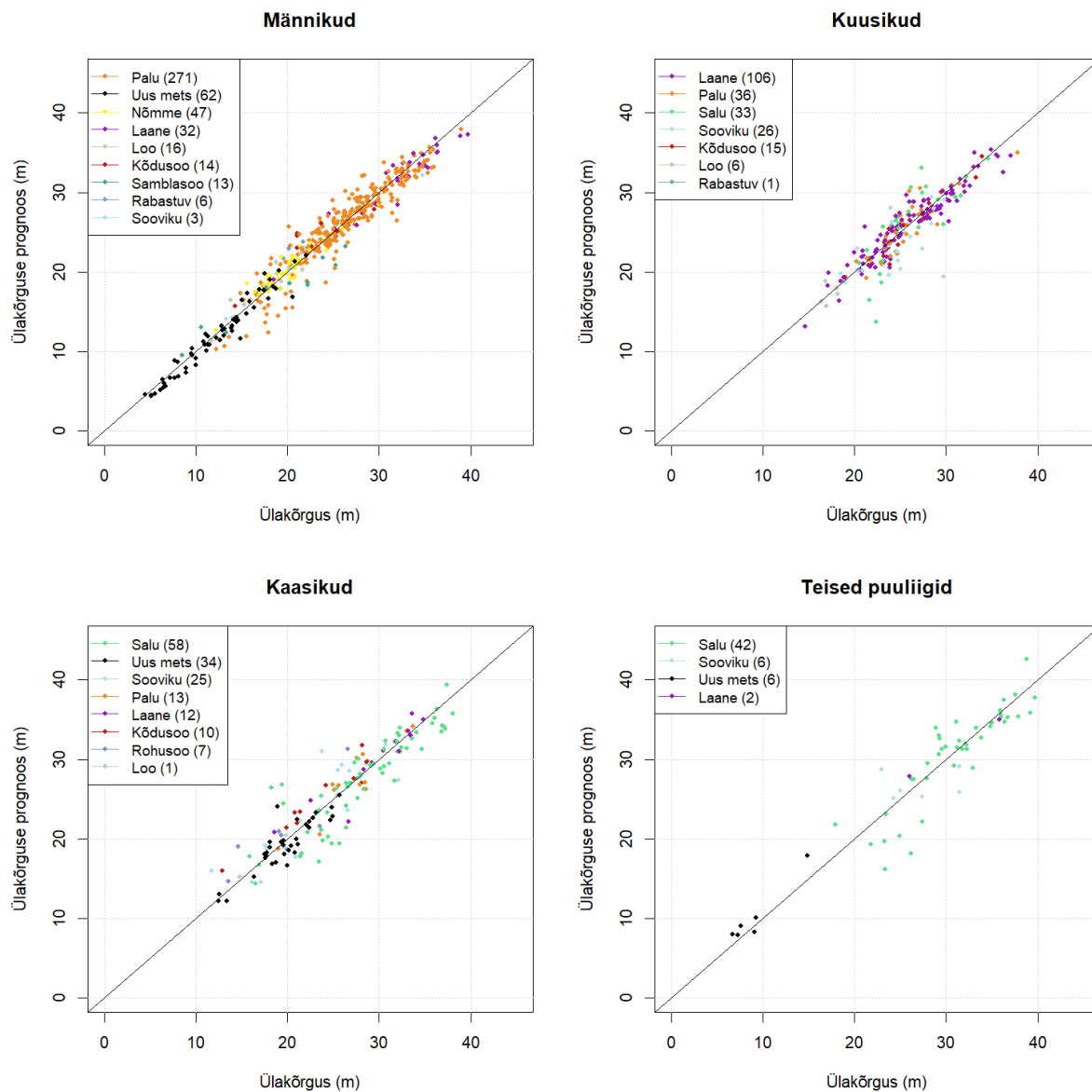
| Mudel | Puuliik | a_1 | a_2 | a_3 | Jääkstandardhälve |
|-----------------------|---------|----------|----------|----------|-------------------|
| Hossfeld giidkõver | MA | 27,91306 | 5713,471 | 2,506266 | 4,825262838 |
| Hossfeld giidkõver | KU | 30,9497 | 1213,14 | 2,109626 | 3,213844951 |
| Hossfeld giidkõver | KS | 183,2605 | 80,35243 | 0,642011 | 3,906186984 |
| Hossfeld giidkõver | JT | 49,35848 | 310,6018 | 1,487717 | 3,002128858 |
| Hossfeldi ADA meetod | MA | - | 389,8254 | 1,343918 | 1,997273522 |
| Hossfeldi ADA meetod | KU | - | 228,4429 | 1,230796 | 2,444165656 |
| Hossfeldi ADA meetod | KS | - | 113,9623 | 1,127522 | 2,810581641 |
| Hossfeldi ADA meetod | JT | - | 153,279 | 1,137806 | 3,470712792 |
| Hossfeldi GADA meetod | MA | - | 6790,435 | 1,593966 | 1,669126168 |
| Hossfeldi GADA meetod | KU | - | 5965,089 | 1,607033 | 2,080636535 |
| Hossfeldi GADA meetod | KS | - | 2706,99 | 1,367278 | 2,446217268 |
| Hossfeldi GADA meetod | JT | - | 4295,805 | 1,458526 | 2,942725883 |

3.3 Ülakõrguse mudeli parendamise võimalusi

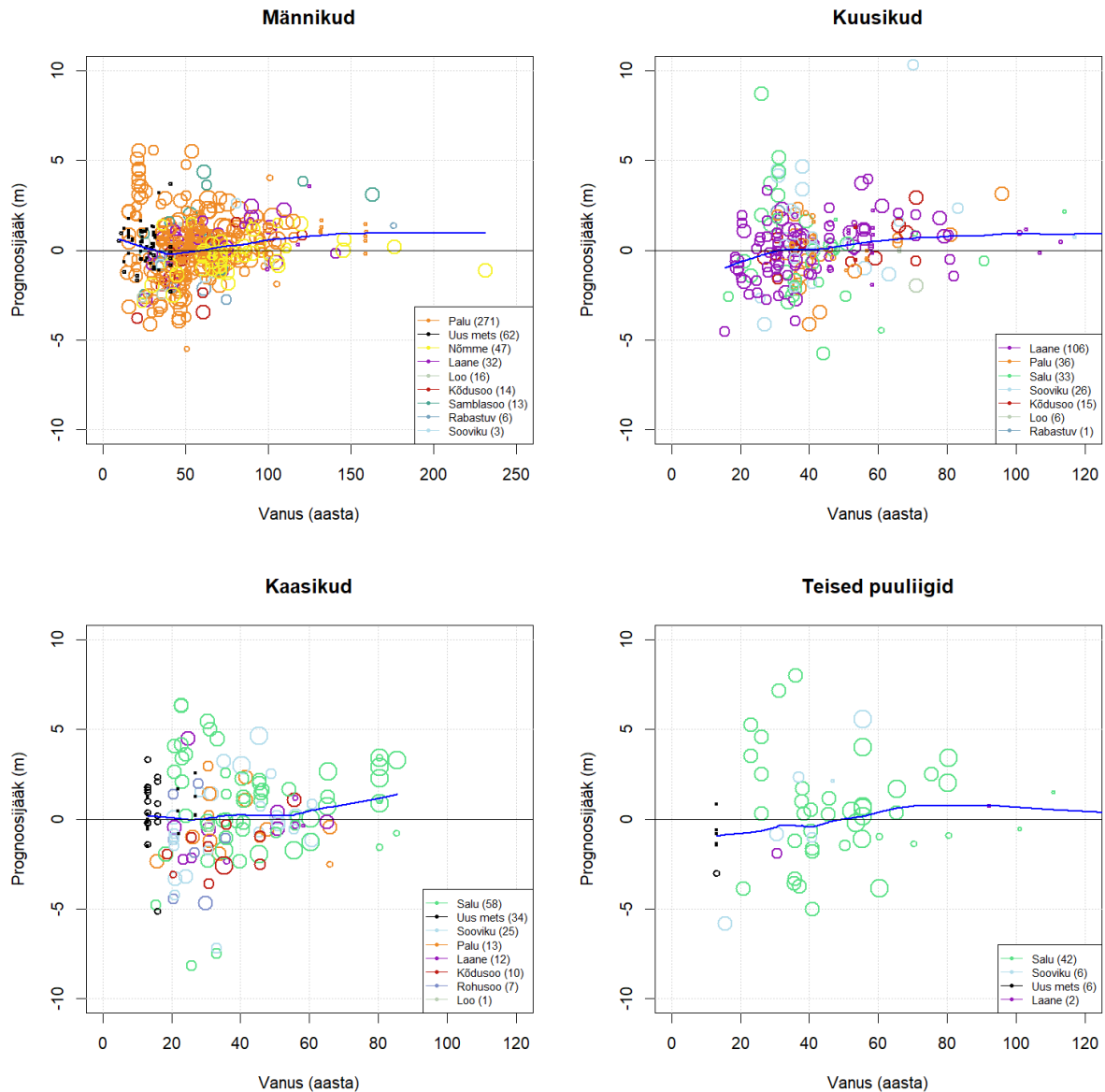
Joonisel 3.8 esitatud Hossfeld IV GADA mudeli (2.4.14), (2.4.15), (2.4.16) ülakõrguse kasvukäigu kõverate süsteem on loogiline, vastab kõrguse kasvu üldistele seaduspärasustele ja sobitub üsnagi rahuldavalt KKPRT püsiproovitükkidelt kogutud andmeseeriatega Ülakõrguse mudelprognooside võrdlus empiiriliste andmetega on esitatud joonisel 3.9. Joonisel 3.9 on näha, et männi (*Pinus sylvestris*) proovitükkide ülakõrguse kasv on kohati kõrgem kui mudel prognoosib. Samuti on näha uue metsa puhul kiiremat ülakõrguse kasvu kui mudel prognoosib, kuid ülejäänud kasvukoha tüübirühmade puhul ei ole see nihe märgatav. Mudeli süstemaatiliseks veaks paarismõõtmiste andmestikul on 0,17 meetrit ja juhuslikuks veaks 1,92 meetrit. Järgnevalt arutletakse, millised võivad olla mudeli puudused ja millised on võimalused mudeli parendamiseks.

Üheks probleemika on asjaolu, et siiani puudub Eesti jaoks üldtunnustatud ülakõrguse määramise metoodika. Antud töös kasutatud proovitüki andmetel ülakõrguse arvutamise algoritm erineb mõnevõrra Tarmu jt (2020) uurimuses kasutatud algoritmist. Antud töös kasutava algoritmi eeliseks on selle universaalsus (kasutatav kõigil proovitüki mõõtmistel). Tarmu jt (2020) uurimuses kasutatud algoritm teatud tingimustel püsiproovitükkidel ei töötanud. Samas (proovitükk 255 näide) võib käesolev algoritm mitme ebasoodsa asjaolu kokkulangemisel anda üllatava tulemuse. Seega on üks tuleviku ülesannetest täiustada ülakõrguse arvutamise algoritmi ning arvutada mudeli parameetrid uuesti.

Joonisel 3.10 on kujutatud prognoosijääke (empiirilise kõrguse ja prognoositud kõrguse vahe) Hossfeld IV GADA mudeliga. Joonisel on kujutatud prognoosiperioodi ringidena, mille raadius on võrdeline prognoosiperioodi pikkusega. Valimis on lühim prognoos pikkusega 4 aastat ja pikim prognoos pikkusega 25 aastat. Keskmine prognoosiperioodi pikkus on 15 aastat. Joonisel on poolpaksu sinise joonega toodud esile prognoosijäägi lokaalne viga vanuse suhtes. Paarismõõtmiste valimis on lühim prognoos pikkusega 4 aastat ja pikim prognoos pikkusega 25 aastat. Keskmine prognoosiperioodi pikkus on 15 aastat. Esmane statistiline analüüs näitas, et perioodi pikkuse suurenedes suureneb prognoosi juhuslik viga, kuid süstemaatiline viga ei olnud oluline.

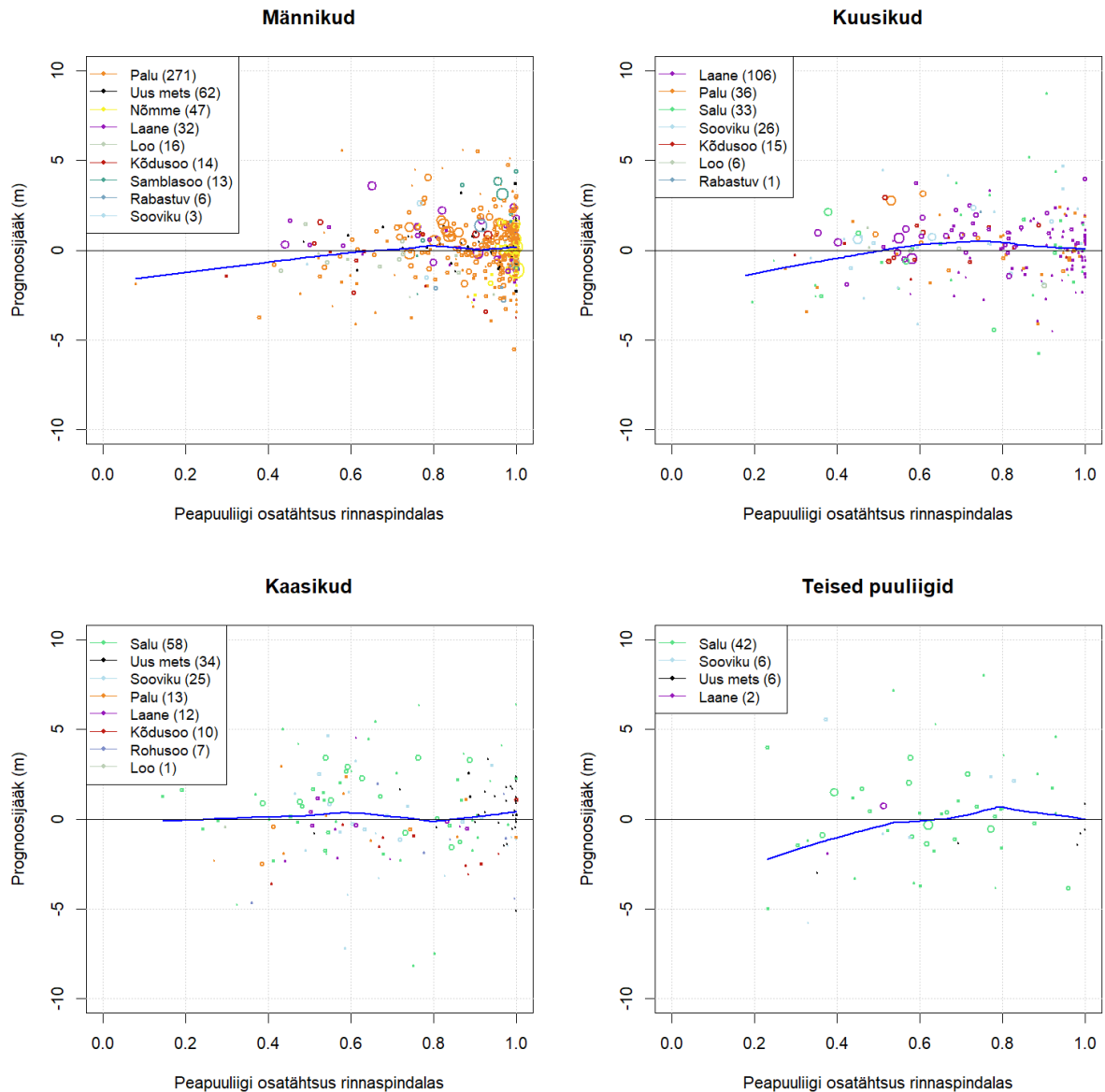


Joonis 3.9 Ülakõrgus mõõdetuna proovitükkidel perioodi lõpus ja selle prognoos Hossfeldi GADA mudeliga perioodi alguse andmetel.



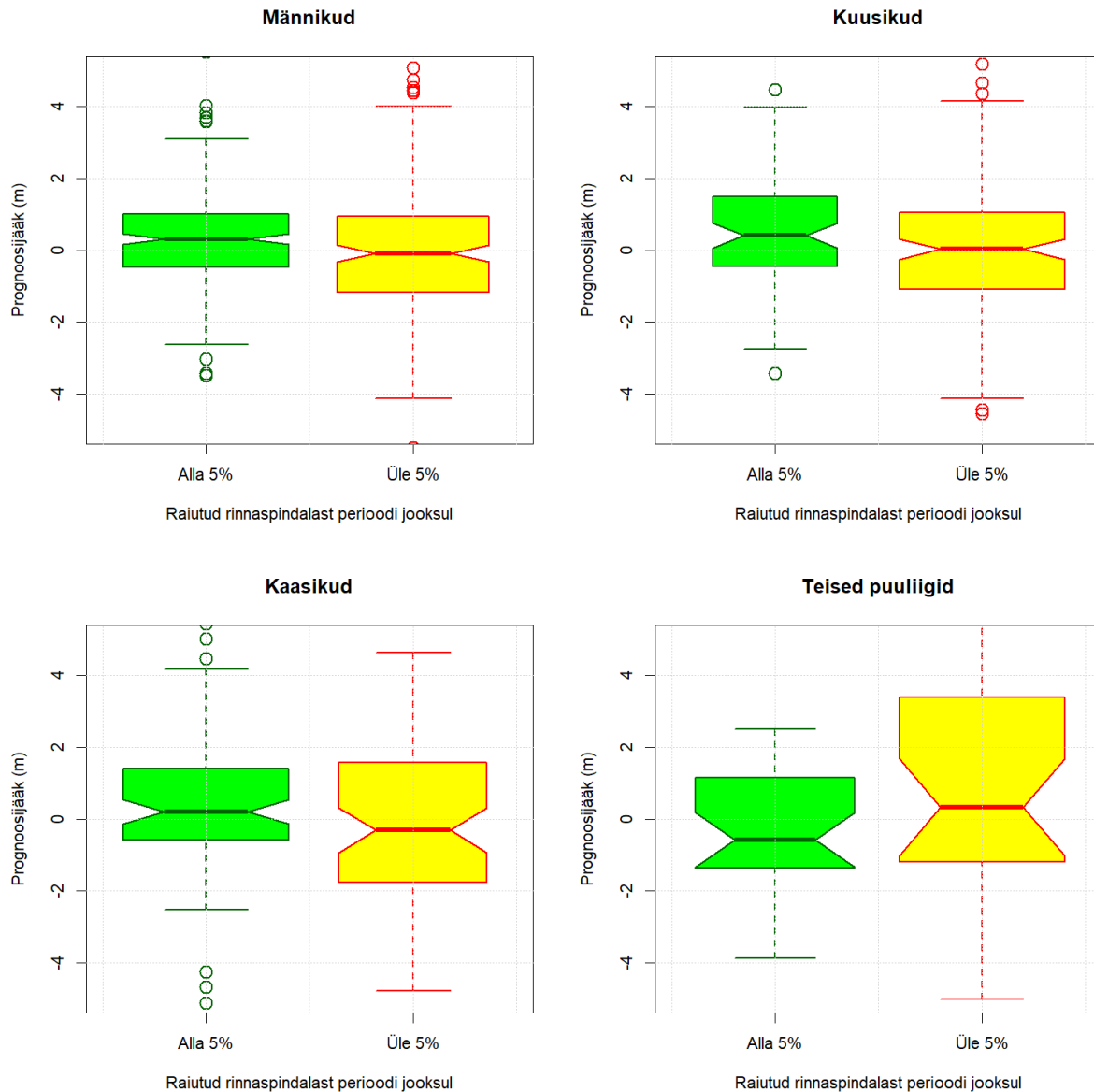
Joonis 3.10 Hossfeldi GADA mudeli prognoosijääkide sõltuvus puistu vanusest ja prognoosisperioodi pikkusest. Prognoosisperioodi pikkus võib olla 4 kuni 25 aastat ning see on võrdeline vaatluse andmepunkti kujutava ringi raadiusega.

Joonisel 3.11 on esitatud Hossfeld IV GADA mudeli prognoosijäägid sõltuvalt peapuuliigi osatähtsusest puistu rinnaspindalas. Joonisel on kujutatud prognoosisperioode ringidena, mille raadius on võrdeline prognoosisperioodi pikkusega. Joonisel on poolpaksu sinise joonega toodud esile jäägi lokaalne viga. Jooniselt on näha, et peapuuliigi osatähtsus puistu rinnaspindalas ei mõjuta suuresti mudeli prognoosijääki.



Joonis 3.11 Hossfeldi GADA mudeli prognoosijäägid Hossfeldi sõltuvalt peapuuliigi osatähtsusest rinnaspindalas.

Joonisel 3.12 on kujutatud Hossfeldi GADA mudeli prognoosijääke sõltuvalt rinnaspindala raiemahust perioodi jooksul. Joonisel on näha, et puistutes, kus on läbi viidud raie, suureneb ülakõrguse hinnangu varieeuvus.



Joonis 3.12 Proгносijäägid Hossfeldi GADA meetodil sõltuvalt rinnaspindala raiemahust.

Kuna puistu ülakõrguse modelleerimise tulemusena loodakse boniteerimisreeglid, siis on väga oluline, et ülakõrguse kasvfunksioon saaks võimalikult hea. Mudeli jääkide analüüsi tulemusena leiti, et enamuspuliigi koefitsiendi ja jääkstandardhälve vahel olulist seost ei ole ehk Hossfeldi funktsiooni kasutades saadi ülakõrguse modelleerimisel mudel, mis kehtib peaaegu võrdselt erinevate puuliigiliste koosseisude puhul. Mõõtmiste vahel toimunud raiete teostamise või mitteteostamise puhul olid aga jääkstandardhälbed mõnevõrra erinevad. Seega tulevikus tuleks ülakõrguse kasvu modelleerimisel arvestada ka harvendusraiate toimumistega.

KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli tutvustada erinevates maades kasutusel olevaid puistu kasvukäigu mudeleid, valmistada ette andmed puistu tagavara juurdekasvu modelleerimiseks ning koostada ülakõrguse kasvukõverate süsteem, mille abil prognoosida ülakõrguse kasvukäiku ja puistu boniteeti.

Kirjandusallikatel põhinev ülevaade kasvukäigu mudelitest näitas, et puistu kasvukäigu prognoosimiseks on olemas väga palju erinevaid mudeleid ja lähenemisviise.

Proovitükkide üldandmete ja mõõdetud puude alusel arvutati takseerandmed, mis on eelduseks edaspidiste modelleerimiste teostamiseks. Eestis on seni kasutusel mudelid, mis põhinevad keskmisele kõrgusele (ka boniteerimismudelid). Ülakõrguse kasvu, mille eeliseks keskmise kõrguse kasvumudeli ees on tema sõltumatus harvedusraietest, kohta pole Eesti andmetel seni mudeleid loodud (Tarmu *et al.* 2020). Antud töös ette võetud puistu ülakõrguse kasvukäigu modelleerimise käigus sai kinnitust asjaolu, et erinevate baasfunktsioonide (antud bakalaureusetöös kasutatud Korfi (Korf 1939 ref Elfving ja Kiviste 1997) ja Hossfeldi IV (Peschel 1822 ref Cieszewski 2003) kasvufunktsioonid) ja modelleerimise meetodi puhul on tulemuseks erinev ülakõrguse kasvukäigu prognoos. Üheks mudelite headuse hindamise parameetrik on jääkstandardhälve, kuid lisaks on vajalik hinnata, kas mudeli prognoosid on ootuspärased Eesti tingimustes või mitte. KKPRT andmeil osutus parimaks Hossfeldi IV funktsioonil loodud algebraline diferentsimudel.

Kuna puistu ülakõrguse modelleerimise tulemusena luuakse boniteerimisreeglid, siis on väga oluline, et ülakõrguse kasvufunktsioon kirjeldaks võimalikult täpselt puistu tegelikku ülakõrguse kasvu. Seetõttu on analüüsitud mudeli jääkstandardhälveid mõõtmiste vahel toimunud raietega ning enamuspuliigi koosseisu koefitsiendiga. Tulemuseks leiti, et enamuspuliigi koefitsiendi ja jääkstandardhälve vahel olulist seost ei leitud ehk Hossfeldi IV funktsiooni kasutades saadi ülakõrguse modelleerimisel mudel, mis kehtib peaaegu võrdselt erinevate puliigiliste koosseisude puhul. Mõõtmiste vahel toimunud raiete teostamise või

mitteteostamise puhul olid aga jääkstandardhälbed mõnevõrra erinevad. Seega tulevikus tuleb ülakõrguse kasvu modelleerimisel arvestada ka harvendusraiate toimumistega.

KASUTATUD KIRJANDUS

- FORMIS. (2021). Metsanduslike mudelite infosüsteem. Valemite loend. Eesti Maaülikool.
https://formis.emu.ee/growfunc/?do=gf_list (18.05.2021)
- Allen II, M.G., Antón-Fernández, C., Astrup, R. (2020). A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned managed Norway spruce forests in Norway. – *Scandinavian Journal of Forest Research*. Vol. 35, No. 5-6, pp. 238–251.
- Álvarez-González, J.G. (2021). Compatible models at different levels of resolution. Käsikiri, 24 lk.
- Cieszewski, C.J., Bailey, R.L. (2000). Generalized algebraic difference approach: a new methodology for derivation of biologically based dynamic site equations. – *Forest Science*. Vol. 46, No. 1, pp. 116-126.
- Elfving, B., Kiviste, A. (1997). Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 98, pp. 125-134.
- Hevia, A., Cao, Q.V., Álvarez-González, J.G., Ruiz-González, A.D., Gadow, K. (2015). Compatibility of whole-stand and individual-tree models using composite estimators and disaggregation. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 348, pp. 46-56.
- Hordo, M., Kiviste, A., Sims, A. (2006). The network of permanent sample plots for forest growth in Estonia. – *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten*. Sektion Ertragskunde: Bei-träge zur Jahrestagung 2006. Göttingen, pp. 115–121.
- Kangur, A., Nigul, K., Padari, A., Kiviste, A., Korjus, H., Laarmann, D., Frelich, L.E., Jõgiste, K., Stanturf, J.A., Paluots, T., Põldveer, E., Kängsepp, V., Jürgenson, H., Noe, S. M., Metslaid, M. (2021). Volume estimation of standing living, dead and downed trees in hemiboreal old-growth forest. Käsikiri, 22 lk.
- Kangur, A., Sims, A., Kiviste, A. (2014). Metsanduslike mudelite ja katseandmete säilitamine. – *Eesti Mets*. Vol. 3 (2013), pp. 32-36.
- Kiviste, A., Álvarez-González, J.G., Rojo-Alboreca, A., A.D., Ruiz. (2002). Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Hispaania: Ministerio de Ciencia y Tecnología. 195 lk.
- Kiviste, A., Laarmann, D., Sims, A. (2015a). Metsa kasvukäigu püsiproovitükkide võrgustiku kordusmõõtmise. Tartu: Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut.
<https://www.kik.ee/sites/default/files/7605.pdf> (25.05.2021)
- Kiviste, A., Hordo, M., Kangur, A., Kardakov, A., Laarmann, D., Lilleleht, A., Metslaid, S., Sims, A., Korjus, H. (2015b). Monitoring and modeling of forest ecosystems: the Estonian Network of

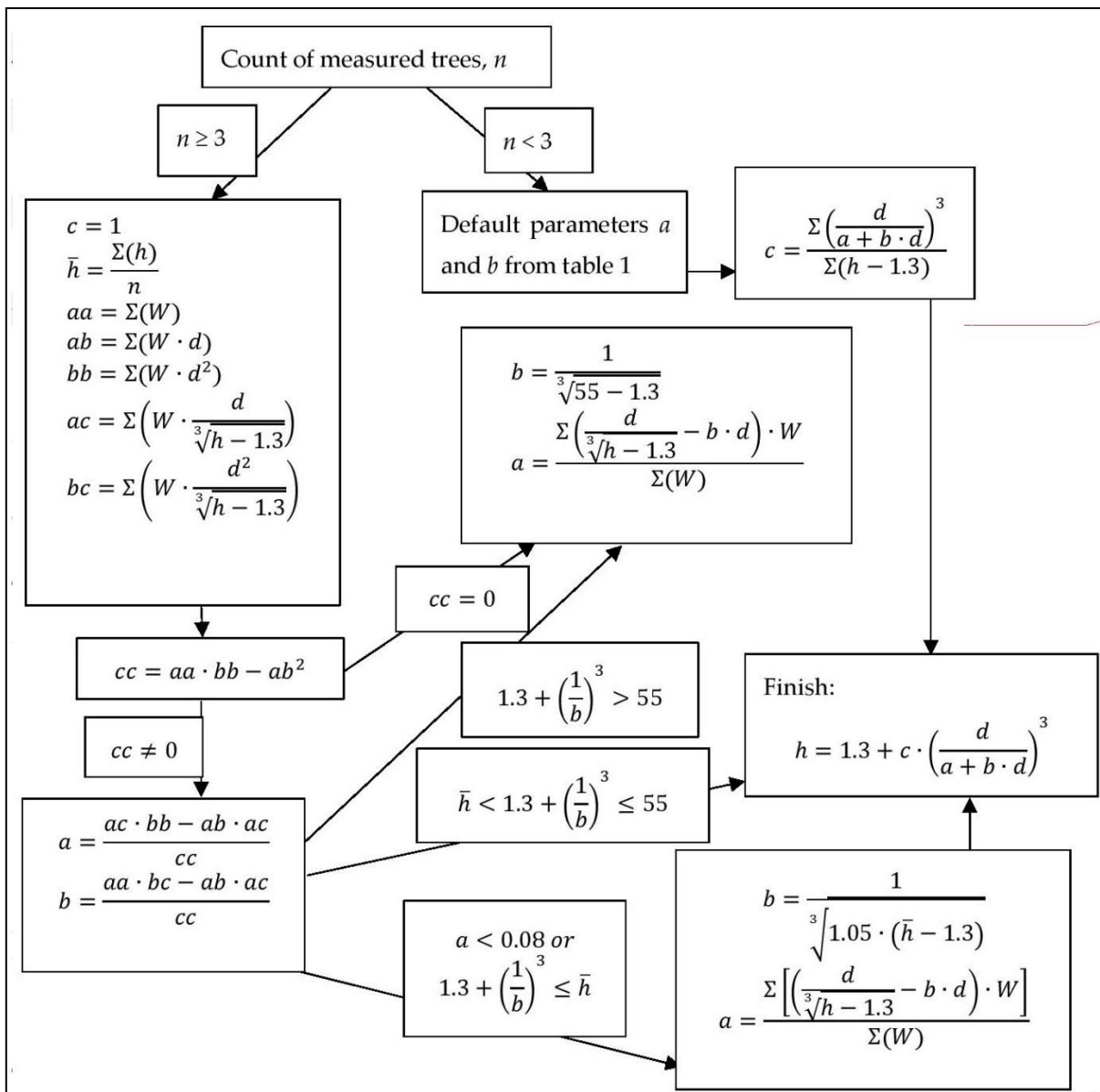
- Forest Research Plots. – *Forestry Studies*. Vol. 62, pp. 26–38. ISSN 1406-9954.
- Kohava, P.** (2001). Eesti Metsad 2000. Metsavarude hinnang statistilisel valikmeetodil. OÜ Eesti metsakorralduskeskus. Tallinn
- Korf, V.** (1939). A mathematical definition of stand volume growth law. – *Lesnicka Prace*. Vol. 18, pp. 337-379, viidatud: **Elfving, B., Kiviste, A.** (1997). Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 98, pp. 125-134 vahendusel.
- Liepa, I.** (2008). Annual Volume Increment of Coniferous Forests in Latvia. – *LLU Raksti*. Vol. 20 (315), pp. 46-52.
- Lõhmus, E.** (2004). Eesti metsakasvukohatüübid. Tartu: Eesti Loodusfoto. 80 lk.
- Metsa korraldamise juhend. (2009). Keskkonnaministri määrus 2. Vastu võetud 16.01.2009, viimane redaktsioon 03.09.2018. <https://www.riigiteataja.ee/akt/13124148?leiaKehtiv> (20.05.2021)
- Hossfeld, J.W.** (1822). Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten., viidatud: **Cieszewski, C.J.** (2003). Developing a Well-Behaved Dynamic Site Equation Using a Modified Hossfeld IV Function $Y_3 = (axm)/(c + xm - 1)$, a Simplified Mixed-Model and Scant Subalpine Fir Data. – *Forest Science*. Vol. 49, No. 4., pp. 539-554. vahendusel.
- Santiago-García, W., Pérez-López, E., Quiñonez-Barraza, G., Rodríguez-Ortiz, G., Santiago-García, E., Ruiz Aquino, F., Urias, J.C.** (2017). A Dynamic System of Growth and Yield Equations for *Pinus patula*. – *Forests*. Vol. 8, No. 12. 13 lk.
- Schumacher, F.X.** (1939). A new growth curve and its application to timber yield studies. – *Journal of Forestry*. Vol. 37, pp. 819-820.
- Sims, A.** (2019). Ülevaade kaasaja SMI metoodilistest alustest ja arvutuskäikudest. – *Statistiline mets. 20 aastat statistilist metsainventeerimist Eestis*. Keskkonnaagentuur, lk 10-15.
- Tarmu, T.** (2018). Puistu ülakõrguse modelleerimine puistu kasvukäigu püsiproovitükkide andmeil. Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 70 lk.
- Tarmu, T., Laarmann, D., Kiviste, A.** (2020). Mean height or dominant height - What to prefer for modelling the site index of Estonian forests? – *Metsanduslikud Uurimused*. Vol. 72 (1), pp. 121–138.
- Vaus, M.** (2004). Metsatakseerimine. Tartu: OÜ Halo Kirjastus. 175 lk.

LISAD

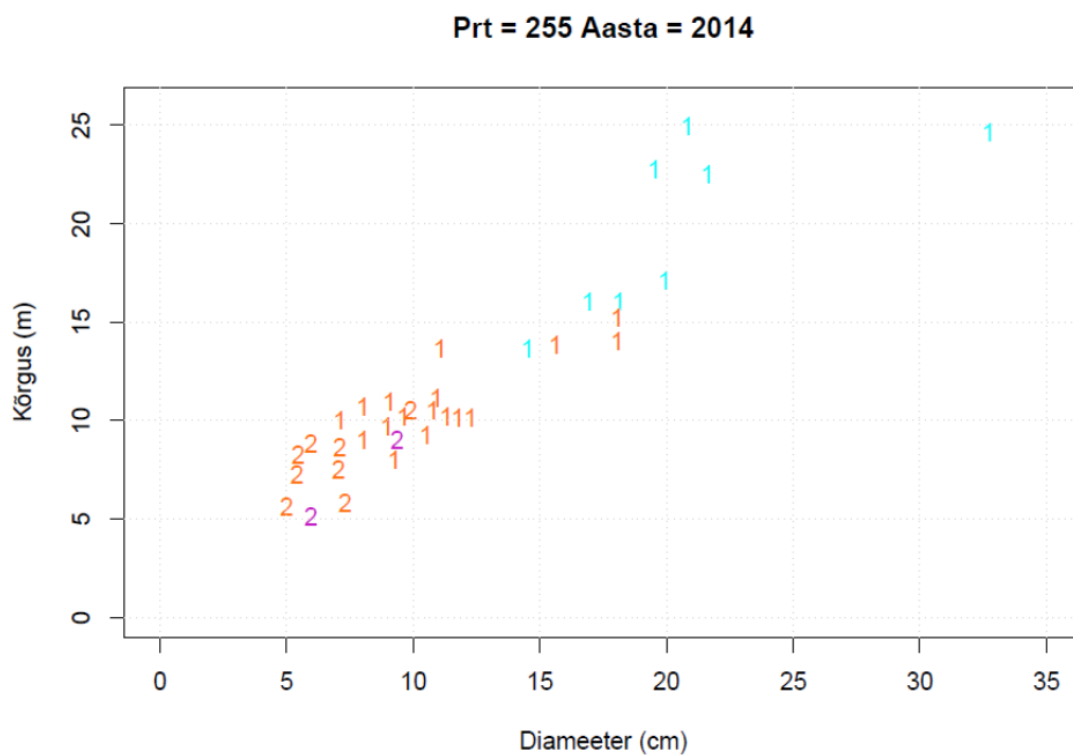
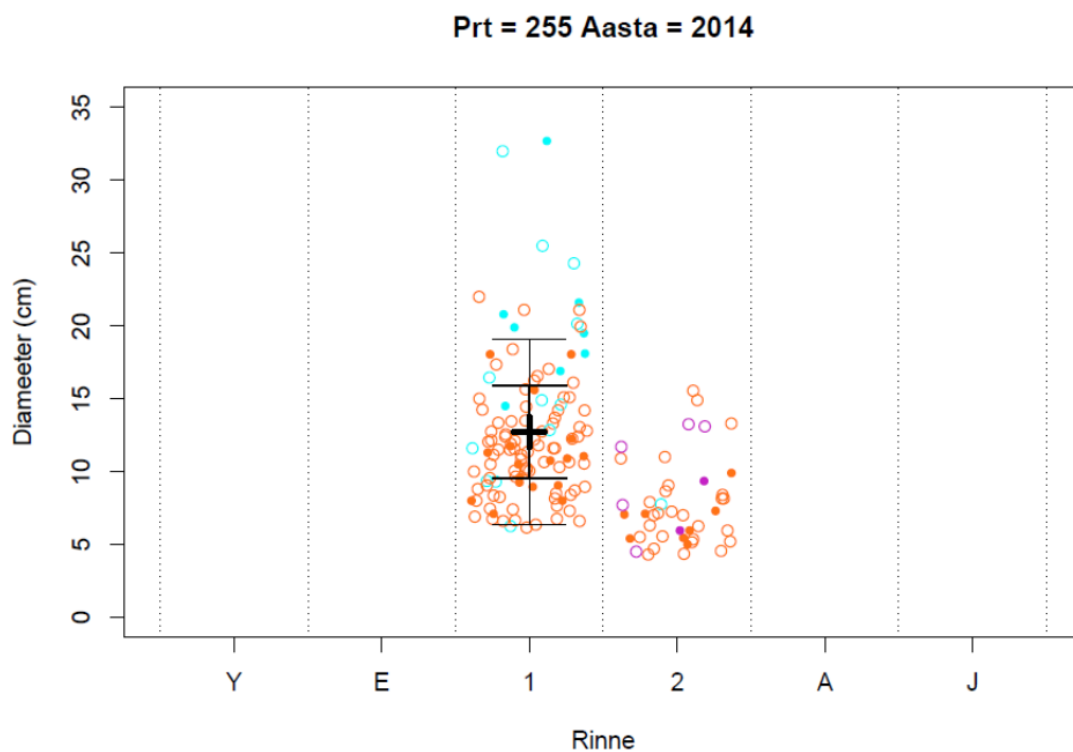
Lisa 1. Puuliikide lühendid (Metsa korraldamise ... 2009)

| | |
|----|----------------------|
| HB | Haab |
| JA | Jalakas |
| KP | Künnapuu |
| KS | Kask |
| KU | Kuusk |
| LH | Lehis |
| LM | Sanglepp |
| LV | Hall lepp |
| MA | Mänd |
| NU | Nulg |
| PN | Pärn |
| PP | Pappel |
| RE | Remmelgas |
| SA | Saar |
| SD | Seedermänd |
| TA | Tamm |
| TL | Teised lehtpuuliigid |
| TO | Teised okaspuuliigid |
| TS | Ebatsuuga |
| VA | Vaher |

Lisa 2. Kõrguskõvera arvutuskäigu skeem (Kangur *et al.* 2021)



Lisa 3. Prt 255 aastal 2014. diameetri jaotus ja diameeter-kõrgus hajuvusdiagramm



Lisa 4. Prt 255 2014. aastal tehtud välitööde pilt



Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Mari-Ann Tammiste,
Sünniaeg 19.12.1997 49712190289

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Puistu kasvukäigu mudelid ja ülakõrguse kasvu modelleerimine Eesti metsa kasvukäigu püsiproovitükkide võrgustiku andmetel,

mille juhendajad on Andres Kiviste, Allar Padari ja Diana Laarmann

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 27.05.2021

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)